

ASTROPHYSIQUE INSTRUMENTALE
Examen 2008-09 Session Decembre 2008

SANS DOCUMENTS - UNE PAGE A4 RECTO-VERSO AUTORISEE - DUREE 3 HEURES

Les 3 parties sont indépendantes. A l'intérieur d'une partie donnée, les questions peuvent la plupart du temps être traitées indépendamment. Il est conseillé de lire le sujet en entier, même rapidement, avant de démarrer.
Présentation notée sur 1 point. le bareme est indiqué.

CONSTANTES MATHÉMATIQUES ET PHYSIQUES

σ_S	$= 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$	Constante de Stefan
h	$= 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$	Constante de Planck
e	$= 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Charge de l'électron
c	$= 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$	Vitesse de la lumière dans le vide

BANDES PHOTOMÉTRIQUES DU VISIBLE ET DU PROCHE IR

Bande	V	R	I	J	H	K	L	M
$\lambda_o(\mu m)$	0.55	0.7	0.9	1.25	1.65	2.2	3.8	4.8
$\Delta\nu(\text{THz})$	97.2	54.5	81.5	40.1	41.9	21.1		
Flux ref (Jy)	3810	2880	2240	1520	980	620	280	153
Paramètre r_o (cm)	8.5					30	50	70
Energie d'un photon (10^{-20} J)					11.4	8.5	5.2	

I- Inefficacité de transfert de CCD dans le visible [10]

Les dispositifs à transfert de charges sont maintenant omniprésents dans les instruments astronomiques. Dans tout l'exercice, on considère un CCD 1024x1024. Une des caractéristiques essentielles des CCD est le bruit de lecture σ_V , mesuré en tension après l'étage de sortie et converti en électrons σ_e via la capacité C de cet étage.

1- Rappelez la relation qui lie σ_V et σ_e via C et montrer pourquoi on a intérêt à travailler avec des capacités de sortie les plus faibles possibles.

2- Si la relation charge - tension en sortie est de $8 \mu V$ par électron, quel bruit en tension ne doit-on pas dépasser pour avoir un bruit de lecture de $5e$? Calculer la valeur de la capacité de sortie correspondante.

Lors du fonctionnement d'un CCD, les électrons sont transférés de proche en proche d'un pixel à l'autre jusqu'à la sortie. La géométrie de ces transferts comporte 1024 registres en parallèles (coordonnée y) qui se déversent dans un registre série au bout duquel se situe l'étage de sortie (coordonnée x , figure 1). On repère les pixels par leurs coordonnées entières (x, y) : le premier pixel lu est le plus proche de l'ampli de sortie (1,1), le dernier est l'opposé en diagonale (1024,1024).

3- Si la fréquence de sortie est de F pixels par seconde, en déduire la fréquence de transfert de pixel à pixel dans le registre série F_S ainsi que dans les 1024 registres parallèles F_P .

Un défaut important des CCD provient du fait que lors d'un transfert d'un pixel au suivant, une certaine proportion des charges ne sont pas transférées. On appelle *Charge Transfer Inefficiency* (CTI, notée ε) cette proportion. Si N_o est le nombre de charges présentes dans le pixel p , on retrouve $N = N_o(1 - \varepsilon)$ dans le pixel suivant. ε dépend de nombreux paramètres, dont essentiellement la fréquence de transfert, et le niveau de signal dans le CCD : ε augmente quand la fréquence de transfert augmente et diminue lorsque le niveau de signal augmente.

4- En partant d'une source de forme gaussienne (en coupe) dans un registre à 1D, indiquer qualitativement la forme de la source après quelques transferts. En déduire comment l'inefficacité de transfert perturbe les calculs de centroïde.

5- Dans quelle direction de transfert x ou y la déformation est-elle la plus forte ?

6- A partir d'un pixel contenant N_o charges, calculer le nombre de charges $N(n)$ restant après n transferts. A l'aide d'un développement limité, exprimer N de manière linéaire en fonction de n et ε . Pour $\varepsilon = 10^{-5}$, calculer au bout de combien de transferts on a perdu 10% de la charge initiale disponible.

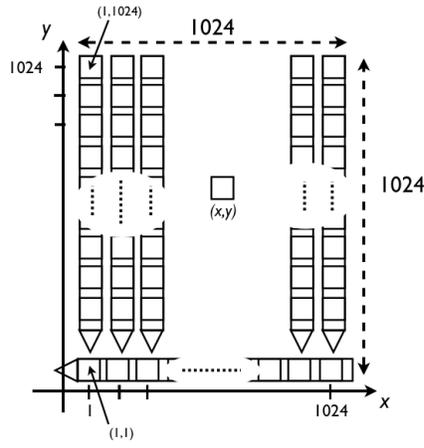


Figure 1: Transfert de charges dans un CCD

7- Pour un pixel quelconque du CCD (figure 1) repéré par ses coordonnées (x, y) , calculer le nombre de transferts n subits avant sortie en fonction de x et y . Quel est le pixel qui subit le plus de transferts et combien (soit n_{\max} cette valeur) ? En déduire la proportion de charge maximale perdue par ce pixel pour $\varepsilon = 10^{-5}$.

8- On s'intéresse à la *quantité de charge* perdue au bout de n transferts, soit ΔN . Exprimer ΔN en fonction de N_o , n et ε . Si le bruit de lecture vaut σ , déterminer l'expression du nombre de transferts n_σ au bout duquel le bruit sur la charge perdue devient égal au bruit de lecture. Déterminer la charge maximale possible dans un pixel dans le pire des cas pour que la quantité perdue reste toujours inférieure au bruit de lecture, toujours pour $\varepsilon = 10^{-5}$. Conclusion pour un CCD 1024x1024 de capacité de stockage 10^5 e.

9- En pratique, l'effet de la fréquence de lecture sur CTI fait que seul les transferts dans le registre série (x) occasionnent une perte de charge sensible. Si on suppose que le CCD est éclairé par une source ponctuelle parfaitement circulaire, placée au centre de l'image, dessiner de manière qualitative dans un diagramme (x, y) l'allure de l'image telle que lue après transfert.

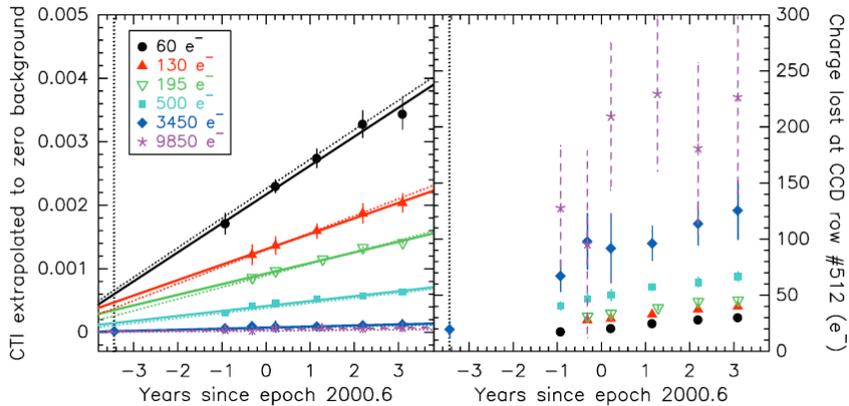


Figure 2: Valeurs de CTI (à gauche) et de charge totale perdue pour 512 transferts (à droite). Un exemplaire de cette figure en grand format (pour effectuer des mesures) est disponible a la fin du sujet.

On s'intéresse maintenant à la physique du transfert de charge. Sur la figure 2 (voir également la version grand format figure 4), on a tracé d'une part l'évolution de CTI avec le signal (croissant de haut en bas pour une année donnée, de 60 e- à 9850 e-, figure de gauche), et le nombre de charges perdues dans un pixel pour une source placée au milieu du CCD (colonne 512 par rapport au schéma considéré plus haut), le signal décroissant cette fois-ci de haut en bas, pour les mêmes valeurs.

Les mesures sont extraites d'une étude publiée dans Goudfrooij et al., 2006, PASP 118, 1455, et concernent le CCD

de l'instrument STIS sur le HST. Les années sont repérées par rapport à une origine en juillet 2000.

10- Commenter la partie gauche de la figure 2. Si on admet que l'inefficacité de transfert est due à des défauts du cristal dont est constitué le CCD, justifiez que CTI augmente avec le temps passé en orbite. Comment interprétez vous le fait que CTI décroisse lorsque le niveau de signal dans un pixel augmente ?

11- A partir de CTI mesurée pour un signal de 195 e-, puis 130 e- en 2003.6 (partie gauche, figure 4), estimez le nombre de charges qui devraient normalement être perdues au bout de 512 transferts (figure de droite) ; Est-ce que votre estimation correspond à la valeur indiquée ? Proposez une explication. (Pourquoi travaille t-on ici sur les données de 2003.6 ?).

12- Si la proportion de signal perdue diminue lorsque le signal augmente, le nombre total de charge perdues lui, augmente lorsque le signal N_o augmente. A partir de l'expression linéaire de ΔN établie précédemment, montrer qu'alors $\varepsilon \propto N_o^{\alpha-1}$ avec $\alpha > 0$. Utiliser la partie droite de la figure 2 pour déterminer α (feuille log – log fournie figure 5).

13- En pratique une mesure effectuée sur la partie gauche de la figure donne $\varepsilon \propto N^{-0.9}$. Proposez une interprétation de la différence observée.

II- Sensibilité d'instrument infrarouge [8]

On considère l'instrument ISAAC spectro-imageur sur le VLT et on utilise le simulateur de temps de pose pour faire une image dans le filtre K d'une source ponctuelle de magnitude K=19, observée avec des temps de pose individuels DIT=30sec pendant un temps total de 440secondes. On a demandé un calcul pour avoir un rapport signal à bruit SNR=20 sous la PSF.

les résultats du simulateur sont les suivants :

```
Seeing      :    0.8 arcsec
Sky magnitude : 13
Airmass     :    1.3
```

```
Total exposure time           :    440.0809 seconds
Number of detector integrations (decimal value) :    14 DCR
Signal-to-noise                :    20.00
Number of pixels for PSF area   :    93.00 pixels
Total number of e- in PSF area (object only)    : 251406.46 e-
Total number of e- in PSF area (object only, 1 DIT) : 17138.20 e-/DIT
Sky bkg. value with sky lines (e/pixel, 1DIT)   : 105033.13 e-/pixel/DIT
Max. intensity at central pixel per DIT (e-, object+sky) : 105536.45 e-/DIT

Detector saturation (e-)       :    180000 e-
Detector Readout Noise         :    10.00 e-/pixel/DIT
Plate scale in arcsec/pixel    :    0.15 arcsec/pixel
```

1- A partir des données ci-dessus, et en détaillant bien les calculs et les justifications, déterminez pour une pose :

- Le signal obtenu par pose
- Le bruit de signal du à la source
- Le bruit de signal de fond de ciel
- Le bruit de lecture sur la PSF

Quel est le bruit dominant ? Pourquoi ?

2- En déduire le SNR par pose (pour un DIT). Montrez ensuite que dans les conditions d'observations adoptées, on atteint bien le rapport signal à bruit souhaité.

3- En pratique on obtient un SNR un peu supérieur à 20 ; expliquez.

3- Le calcul précédent ne fait pas intervenir le courant d'obscurité. Que pensez vous de cette approximation ?

4- A quel niveau de dynamique travaille t-on ? Ce choix vous paraît-il judicieux ? Jusqu'à quelle valeur de seeing pouvez-vous travailler sans saturation ?

5- Expliquer pourquoi on peut considérer que la PSF contient 93 pixels. La valeur de seeing indiquée est-elle celle dans le visible ou dans la bande K ?

Dans les conditions d'observations requises, on travaille avec une magnitude de fond de ciel $K=13$ par arcsec².

6- A partir des données ci-dessus, déterminer :

- Le flux de fond de ciel (en Jy) par arcsec² dans la bande K,
- Le nombre de photons de fond de ciel reçus par seconde et par arcsec²,
- Le nombre de photons de fond de ciel reçus par pixel et par DIT

7- A partir de valeurs réalistes de la transmission optique et du rendement quantique de l'instrument, montrer que les calculs précédents sont cohérents (à un facteur de l'ordre de 2 près) avec les résultats donnés par le simulateur.

8- Pensez vous que l'émission des raies de ciel intervienne fortement dans le flux de fond ?

9- Si la masse d'air passe de 1.3 à 1.5, donnez une estimation de la variation de flux de fond de ciel attendue.

10- On souhaite refaire le calcul de SNR pour un seeing double. Quels termes vont varier ? Quels termes restent constant ? En déduire sans calcul que le SNR sera divisé par 2.

III- Bolomètre polarisé en tension [2]

Les instruments les plus sensibles actuellement utilisés en astronomie utilisent des "senseurs à transition brutale" (*transition edge sensors*, ou TES). Ils exploitent la variation de résistance R d'un composant relié à une charge à basse température telle que présentée sur la figure 3. On s'intéresse à la polarisation du bolomètre sous la source de tension V (sans apport d'énergie lumineuse extérieure). A l'état d'équilibre, la puissance électrique dissipée dans le composant est égale à celle évacuée dans la charge froide.

1- Montrer que si $T > T_o$, P décroît et le composant refroidit. De même, si $T < T_o$, montrer que P augmente.

2- En déduire que lorsqu'il est attaqué en tension, le montage se polarise automatiquement à $T = T_o$, $R = R_o$.

3- Une fois le composant polarisé, calculer l'écart de sa température à la température de la charge froide T_C . Conclure sur la contrainte d'ajustement de T_C par rapport à T_o .

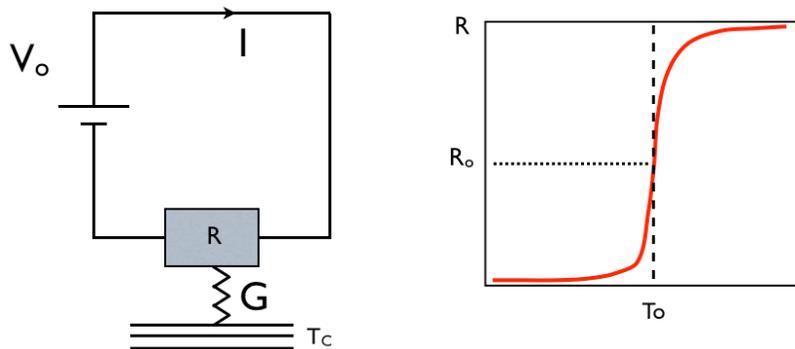


Figure 3: Transition Edge Sensor

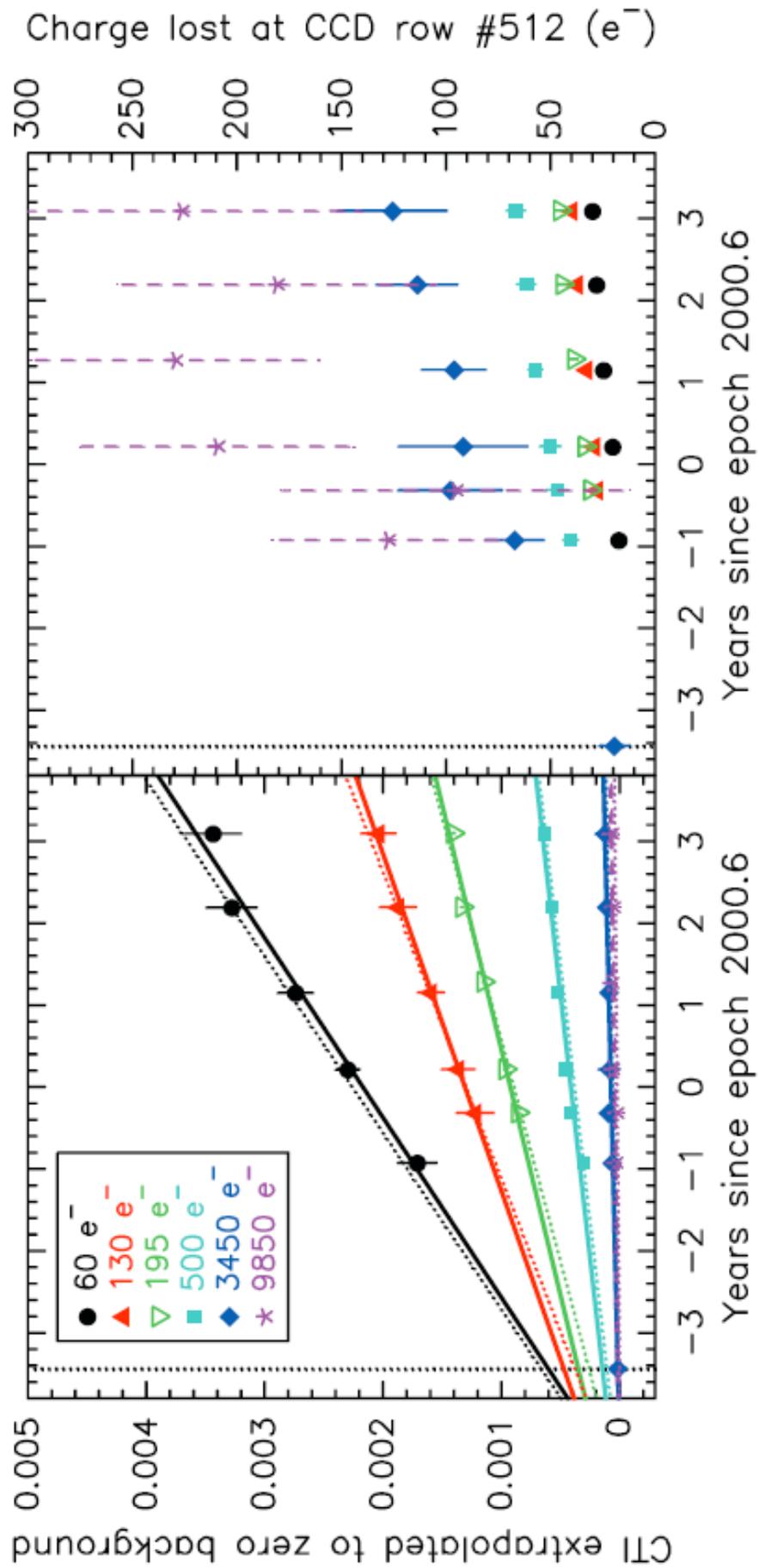


Figure 4:

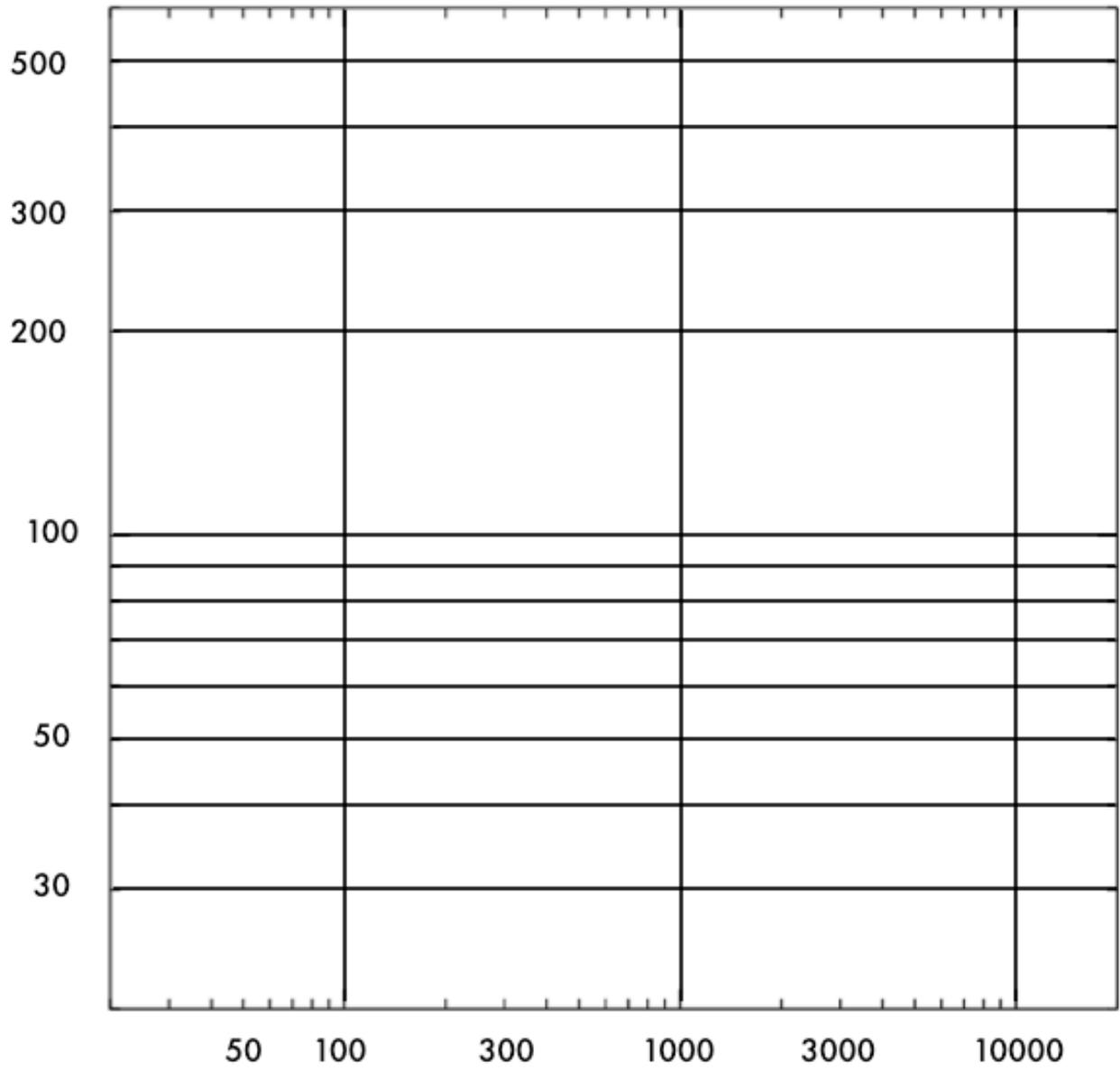


Figure 5: