

# TP CCD – fonctionnement

Ce TP a pour objectif de vous faire comprendre comment fonctionne une chaîne d'acquisition d'image numérique. Vous vous limiterez ici à l'étude du capteur CCD (*Charge Coupled Device*) et de l'étage de pré-amplification (cf. cours). Vous étudierez donc le fonctionnement d'un capteur CCD, la mise en forme des horloges permettant de lire l'image contenue dans le CCD. Dans un troisième temps, vous étudierez les différents signaux d'horloge avec un oscilloscope.

**Avant de venir en TP, merci de préparer les parties 1.1 et 1.2. Vous rendrez un pré-compte-rendu à l'enseignant avant la séance.**

La caméra numérique utilisée pour les TP est une caméra Audine, équipée d'un capteur CCD Kodak AF400.

Matériels utilisés :

- 1 raspberry fonctionnant sous Linux permettant de lancer le logiciel Audela qui permet de piloter la caméra en cliquant sur **TP CCD**, puis cliquer sur **Execute**;
- 1 caméra Audine (Figure 2);
- Le boîtier noir d'alimentation de la caméra (Figure 1);
- 1 nappe pour raccorder la caméra au raspberry;
- 1 plaquette sur laquelle est déportée la chaîne d'acquisition complète (capteur CCD + chaîne électronique analogique/numérique); ce qui permet de visualiser à l'oscilloscope les différents signaux de contrôle de chaîne d'acquisition et le signal de sortie du CCD (Figure 1);
- 1 oscilloscope (Figure 3).

Le boîtier d'alimentation possède un interrupteur général placé à l'arrière (cf. Figure 1). La mise sous tension de la caméra se fait dans l'ordre suivant : allumer l'alimentation +/-15 V (permettant d'alimenter les différents étages du capteur et de la chaîne électronique), puis celui du ventilateur. **Ne pas allumer le module de refroidissement Peltier** (qui permet de refroidir le capteur CCD en dessous de 0°C).

Pour éteindre la caméra, merci de procéder de manière inverse i.e. arrêter le ventilateur, puis l'alimentation +/-15 V. En cas de doute sur la procédure, merci de vous référer à l'enseignant(e).

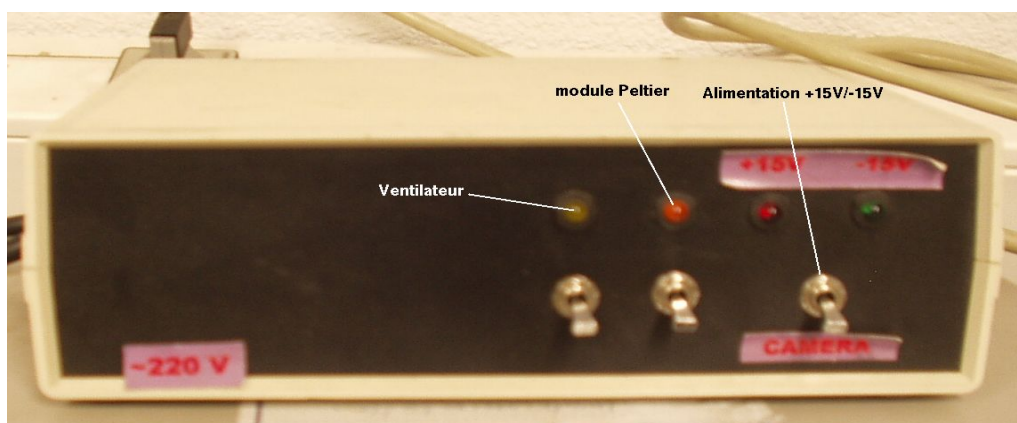


Figure 1 – Boîtier d'alimentation de la caméra (interrupteur général au dos du boîtier).

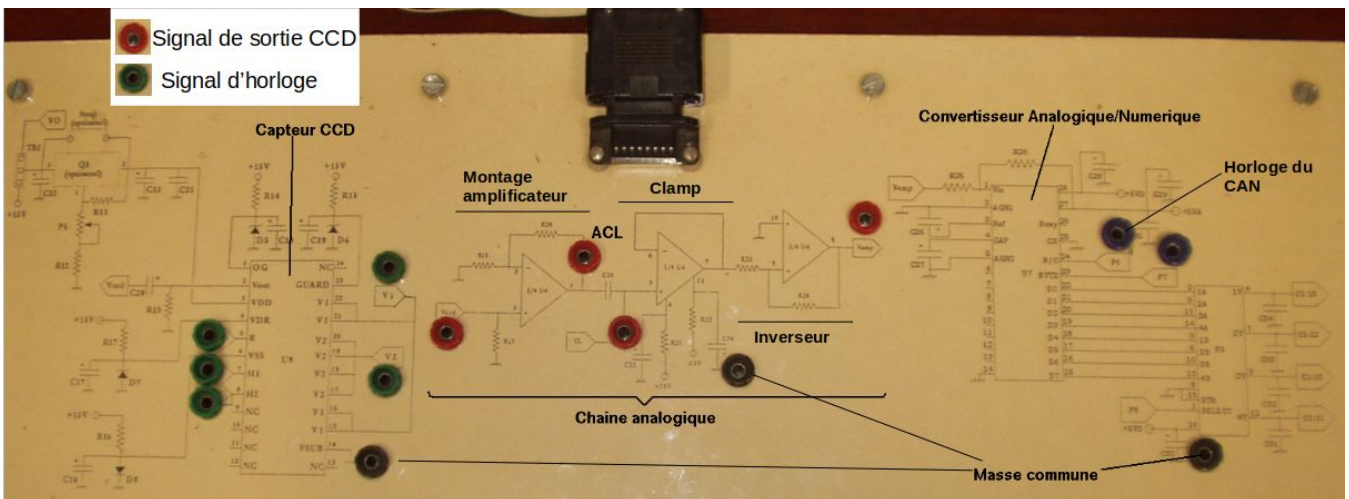


Figure 2 – Capteur CCD & chaîne d'acquisition (analogique et numérique) reportés sur une tablette.

Figure 3 – Oscilloscope.



Pour allumer le raspberry, merci d'utiliser les instructions de la feuille A4 plastifiée.

# 1. Fonctionnement général d'une caméra CCD

Pour le fonctionnement du CCD, merci de vous aider du [cours](#). Ici, vous étudierez le capteur CCD Kodak AF400.

**Pourquoi ne faut-il pas allumer le module Peltier ?** Nous rappelons que le Peltier permet de refroidir le CCD en dessous de 0°C.

## 1.1. La matrice

A partir du schéma ci-dessous et de la datasheet du capteur, repérer les caractéristiques/dimensions et les différentes zones de la matrice CCD. De quel type de CCD s'agit-il ? Combien a-t-il d'électrodes par photo-site ?

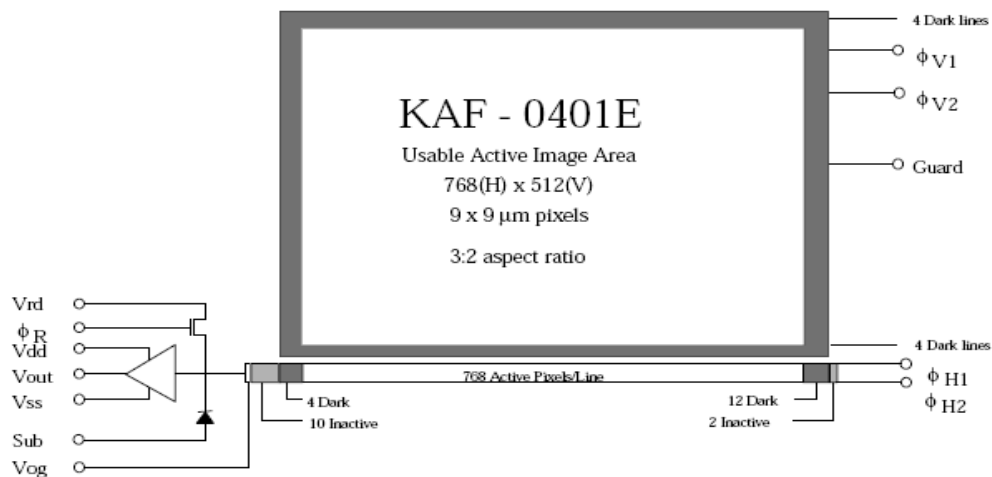
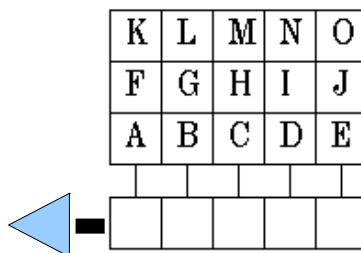


Figure 4 – Schéma du capteur CCD Kodak AF400

## 1.2. Le transfert des charges

Dans la figure ci-dessous, chaque photo-site de la matrice a reçu une certaine quantité de lumière et a généré des électrons notés par des lettres de l'alphabet.



1) Quelles opérations doivent être effectuées pour amener les charges de la matrice à l'étage de pré-amplification (ici représenté par le triangle bleu) ? Vous pouvez faire des schémas pour répondre à la question.

2) Préciser le nombre d'horloges nécessaires pour assurer la lecture de la caméra. Justifier votre réponse.

### 1.3. Acquisition d'une image

Pour ouvrir Audela, cliquer sur l'icône **TP CCD** sur le Bureau, puis cliquer sur **Execute**.

Une interface va s'ouvrir. En haut de cette interface, sélectionner **Method = full\_frame** pour faire des images. Le temps de pose (en seconde) et le binning (un mode de lecture de la caméra) pourront être également ajustés.

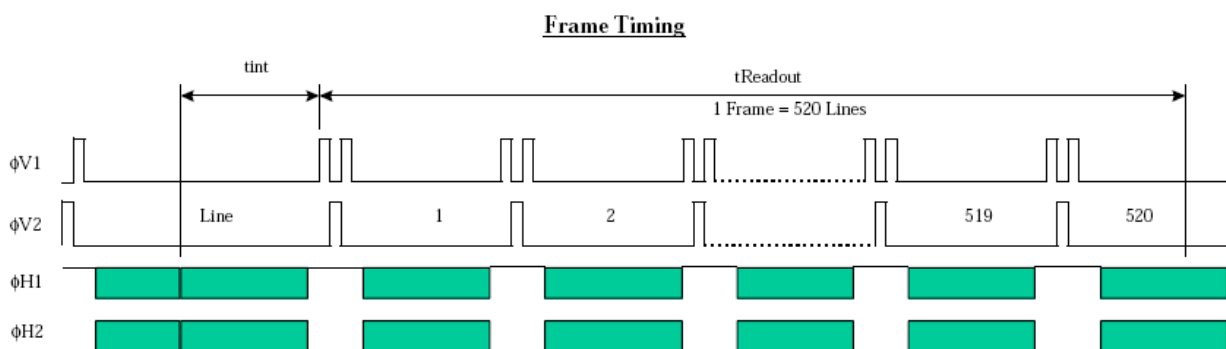
Pour prendre une image, appuyer sur **Acquisition**.

Toutes les images réalisées pourront être sauvegardées au format .fits et se trouveront dans le répertoire **/home/user/Documents/guitastro/products**.

- 1) Faire l'acquisition d'une image avec un temps de pose de 10 s (caméra face vers la table).
- 2) A quoi correspond l'image obtenue ?
- 3) Refaire une image en soulevant cette fois la caméra (demander à l'enseignant(e)). Commenter l'image obtenue. A quoi correspond-elle ? Noter la valeur de l'intensité dans ce cas.

## 2. Chronogramme

Le chronogramme correspond à l'enchaînement des variations des tensions appliquées aux électrodes du capteur CCD pour permettre le déplacement des charges. Il s'agit de signaux analogiques en créneaux (un état haut ou un état bas). Ci-dessous, le chronogramme général de lecture de la matrice CCD (extrait de la datasheet de Kodak).



$t_{int}$  et  $t_{Readout}$  correspondent respectivement au temps de pose et au temps de lecture (incluant la numérisation) des charges formées pendant  $t_{int}$ .

### Question

1. Commenter le chronogramme ci-dessus en expliquant l'enchaînement des différentes actions sur le capteur pendant le transfert des charges.

Le tableau ci-dessous indique les durées minimales à respecter pour assurer un bon transfert des électrons.

Description	Symbol	Min	Nom	Max	Unit	Notes
$\phi H1, \phi H2$ Clock Frequency	$f_H$		10	15	MHz	1, 2, 3
$\phi V1, \phi V2$ Clock Frequency	$f_V$		100	125	kHz	1, 2, 3
Pixel Period (1 Count)	$t_e$	67	100		ns	
$\phi H1, \phi H2$ Setup Time	$t_{\phi HS}$	0.5	1		us	
$\phi V1, \phi V2$ Clock Pulse Width	$t_{\phi V}$	4	5		us	2
Reset Clock Pulse Width	$t_{\phi R}$	10	20		ns	4
Readout Time	$t_{readout}$	34	50		ms	5
Integration Time	$t_{int}$					6
Line Time	$t_{line}$	65.8	95.6		us	7

**Tableau 1** – Conditions d'opération du capteur CCD.

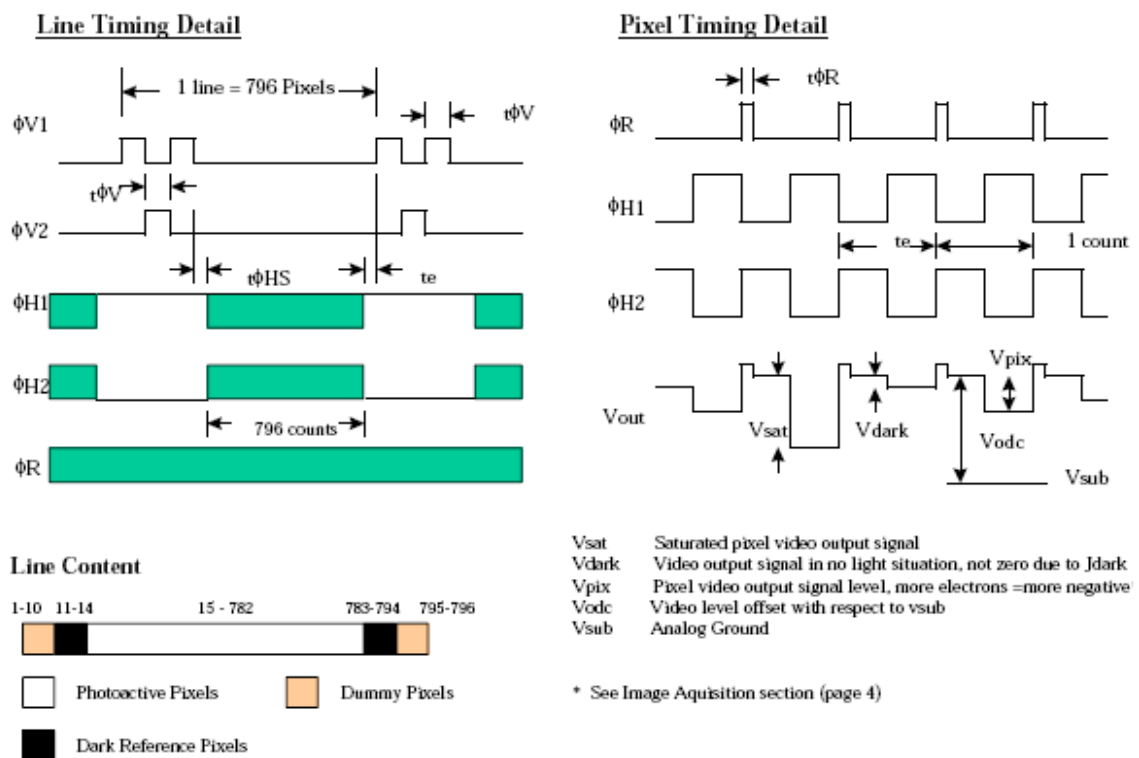


Figure 5 - Timing Diagrams

Les deux chronogrammes ci-dessus montrent les détails du chronogramme à respecter pour une lecture en binning 1x1.  $V_{out}$  correspond à la tension en sortie aux bornes du pré-amplificateur de charge.

## 2.1. Lecture d'un CCD à 2 phases

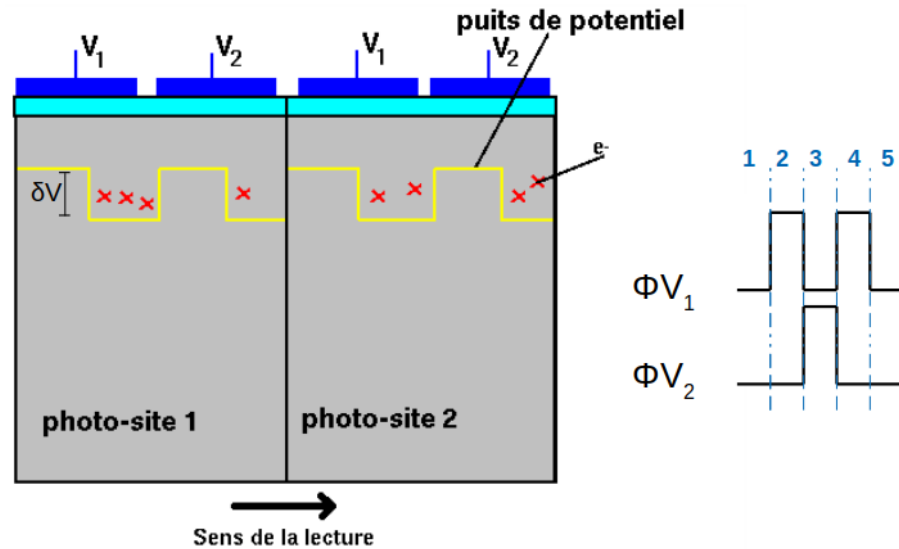


Figure 6 – Schéma montrant le puits de potentiel dans chaque photo-site de la matrice pour l'étape 1 (i.e.  $\Phi V_1$  &  $\Phi V_2$  à l'état bas)

- 1) Afin d'assurer le stockage et le transfert des charges, la forme du potentiel sous une électrode sera considérée comme étant une marche de potentiel (cf. Figure 6). La barrière de potentiel  $\delta V$  sous chaque électrode ne dépend pas de la tension de polarisation de l'électrode.

**Pour rappel, l'état haut des horloges correspond à une tension 0 V, alors que l'état bas correspond à une tension +V.**

Rappel : Plus la tension appliquée à une électrode est forte et plus la marche de potentiel s'enfoncera dans la profondeur du capteur. Inversement plus la tension appliquée est faible et plus la marche de potentiel "remonte vers la surface du capteur".

Dessiner l'évolution des puits de potentiel pour deux photo-sites adjacents des étapes 1 à 5 et montrer que cela permet de transférer les électrons d'un photo-site à l'autre.

- 2) Est-ce que l'étape 4 a une utilité pour transférer les électrons d'un photo-site à l'autre ? Si ce n'est pas le cas, à quoi sert-elle selon vous ? Justifier votre réponse.

## 3. Analyse des signaux à l'oscilloscope

Utiliser le cours et les points étudiés aux sections précédentes pour expliquer dans votre compte-rendu les actions physiques produites sur le capteur à partir des signaux observés à l'oscilloscope et leur enchaînement dans le temps.

Noter clairement ce que vous observez à l'écran de l'oscilloscope. Noter aussi sur votre copie les différents réglages utilisés. Faire des images de l'écran de l'oscilloscope avec vos smartphones de manière à les inclure dans votre compte-rendu.

Prendre un temps de pose de 5 s.

### 3.1. Analyse de $\Phi V_1 - \Phi V_2$

Oscillo:  $\Phi V_1$  sur la **voie 1** et  $\Phi V_2$  sur la **voie 2**. Trigger sur le front montant de  $\Phi V_1$ .

- 1) Observer et décrire ce qui se passe pendant la séquence de lecture (échelle des temps  $\sim 10-20 \mu\text{s}$ ) en binning 1x1. Noter la durée de chaque palier. Comparer vos valeurs avec celles du tableau 1. Discuter vos résultats.
- 2) Pourquoi existe-t-il une valeur minimale ?
- 3) Est-ce que  $\Phi V_1$  et  $\Phi V_2$  sont actives pendant le temps de pose ? Justifier votre réponse. Vous pourrez vous aider des résultats de la Section 2.

### 3.2. Analyse de $\Phi H_1 - \Phi V_2$

Analyser en binning 1x1 les signaux  $\Phi H_1$  (**voie 2**) et  $\Phi V_2$  (**voie 1**) pendant la phase de lecture. Déclenchement sur le front montant de  $\Phi V_2$ .

- 1) Observer les signaux et expliquer ce qui se passe. Adapter l'échelle de temps le cas échéant.
- 2) Mesurer les différents paliers de  $\Phi H_1$  (durée) pendant la séquence de lecture.
- 3) En déduire le temps nécessaire pour transférer horizontalement les charges d'un photo-site à l'autre.
- 4) Combien de temps faut-il pour transférer verticalement les charges d'un photo-site à l'autre ?
- 5) Calculer le temps nécessaire pour lire l'ensemble des charges de la matrice. Expliquer votre calcul.

### 3.3. Analyse des signaux $\Phi H_1 - \Phi R$

Analyser en binning 1x1 les signaux  $\Phi H_1$  (**voie 2**) et  $\Phi R$  (**voie 1**) pendant la séquence de lecture. Déclenchement sur le front montant de  $\Phi R$ .

- 1) Le signal  $\Phi R$  est associé à quelle partie du capteur CCD ?
- 2) Sur quel front de  $\Phi H_1$  le signal  $\Phi R$  passe-t-il à l'état haut ?

### 3.4. Analyse des signaux $CL - \Phi R$

Analyser en binning 1x1 les signaux  $CL$  (**voie 2**) et  $\Phi R$  (**voie 1**) en distinguant la séquence de lecture. Déclenchement sur le front montant de  $\Phi R$ .

CL correspond à une valeur amplifiée et filtrée de la tension aux bornes de l'étage de pré-amplification.

- 1) Commenter la forme du signal CL pendant la phase de lecture. Combien de paliers sont visibles ?
- 2) Relancer une nouvelle acquisition mais cette fois ajouter un peu de lumière en soulevant la caméra pendant la phase de lecture (demander l'aide de l'enseignant(e)).
  - a) Que se passe-t-il ?
  - b) A quoi correspondent les différents paliers ?
  - c) En regardant le signal CL, retrouver quelle information est codée.
  - d) Pourquoi observez-vous un signal même lorsque la caméra est dans le noir (i.e. face vers la table) ?
  - e) En déduire le rôle de  $\Phi_R$ . Vous pourrez également visualiser CL et  $\Phi_{H_1}$  pour vous aider.