

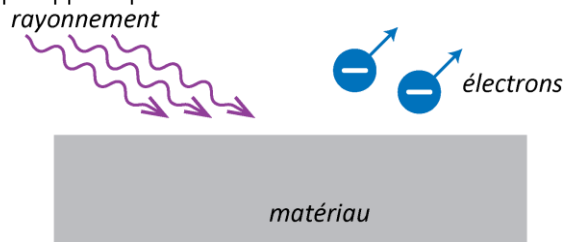
L'acquisition des images numériques par le capteur CCD

Inspiré du manuel numérique d'Image <https://spcl.ac-montpellier.fr/moodle/>

I. La photodiode, un photorécepteur.

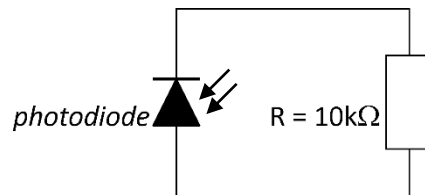
DOCUMENT 1 : l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est observé lorsqu'un solide (métallique ou semi-conducteur) reçoit un rayonnement. Si celui-ci transporte une énergie suffisante, des électrons sont arrachés aux atomes qui constituent ce solide, ce qui génère un courant électrique appelé "photocourant" :



La photodiode est un composant électronique à la base de nombreux systèmes d'acquisition des images, notamment le capteur CCD qui équipe les appareils photographiques numériques. Nous allons d'abord observer le comportement d'une photodiode.

Montage à réaliser :



1. Proposer le protocole d'une expérience permettant de mettre en évidence que la photodiode est bien le siège d'un effet photoélectrique. Le protocole doit inclure deux mesures comparatives.
2. Réaliser l'expérience proposée et noter les résultats des deux mesures effectuées.
3. Le circuit que nous venons de réaliser est un capteur de lumière puisqu'il génère un signal électrique qui varie selon qu'il reçoive de la lumière ou non. Comment peut-on le modifier pour que ce dispositif devienne un capteur de lumière rouge uniquement ?

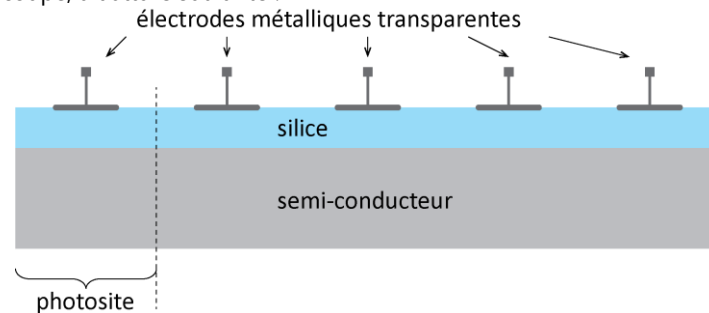
II. Le capteur CCD.

Étudier attentivement les documents 2 et 3, qui donnent une description simplifiée du capteur CCD.

DOCUMENT 2 : le capteur CCD, un capteur à transfert de charge

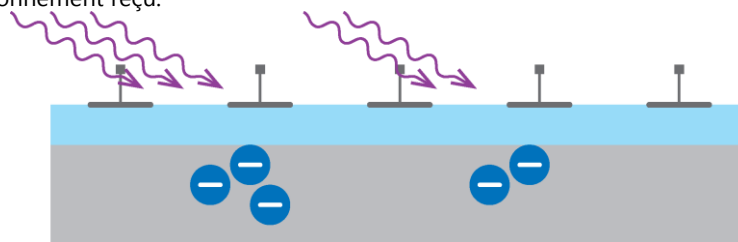
Un capteur CCD (charge coupled device, ou en français "dispositif à transfert de charge") est un composant électronique photosensible servant à convertir la lumière qu'il reçoit en un signal électrique analogique. Ce signal est ensuite amplifié, puis numérisé par un convertisseur analogique-numérique et enfin traité pour obtenir une image numérique.

Le capteur CCD, vu en coupe, a l'allure suivante :



Chaque électrode peut être connectée ou déconnectée à la borne positive d'un générateur très rapidement grâce à un signal de commande que nous n'étudions pas ici.

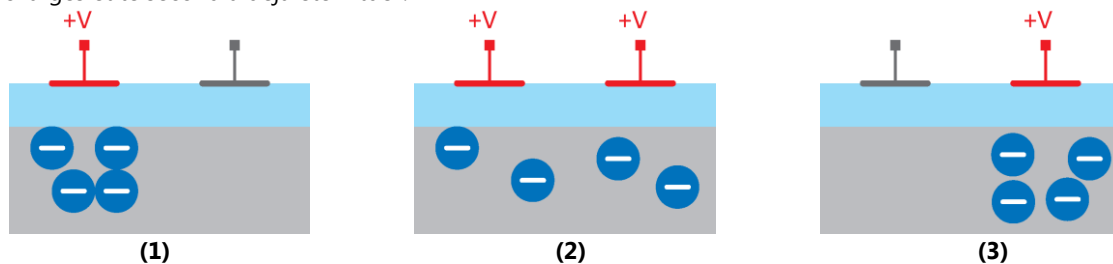
Chaque électrode avec les deux couches qui se trouvent dessous se comporte comme une photodiode. Mais comme la couche de semi-conducteur n'est pas reliée électriquement, les charges créées par effet photoélectrique s'y accumulent et ne sont pas évacuées. Ainsi, le nombre d'électrons accumulés est proportionnel au rayonnement reçu.



Une fois qu'il a été éclairé, le capteur CCD contient donc des charges dont la disposition est fonction de l'image acquise.

Afin de convertir cette répartition de charge en un signal électrique qui code l'image à acquérir, il faut alors "vider" chaque photosite dans un dispositif électrique approprié (voir document 3). Cela suppose que chaque photosite puisse transférer au site voisin.

Pour comprendre le principe de ce transfert de charge, considérons deux photosites voisins : le premier contient des charges et le second a déjà été "vidé".



(1) Les charges du 1^{er} photosite sont piégées tant que l'électrode est positive.

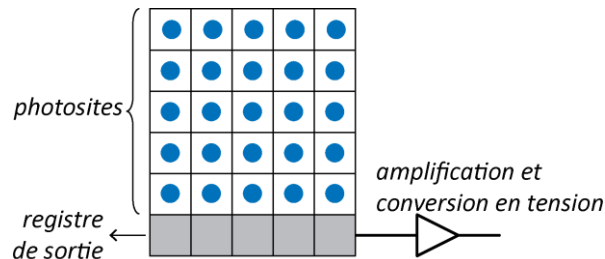
(2) La seconde électrode impose alors elle aussi un potentiel positif. Les charges se répartissent alors entre les deux photosites.

(3) La première électrode est déconnectée : les charges s'accumulent alors dans le second photosite.

Ainsi les charges du premier photosite ont été transférées dans le second.

DOCUMENT 3 : acquisition d'une image numérique par le capteur CCD

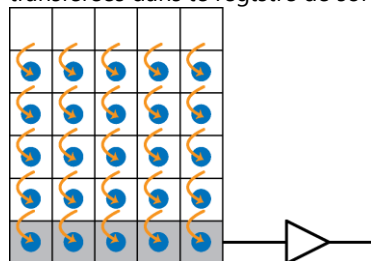
Le capteur CCD est une "grille de photosites" tels celui décrit dans le document 2. Une ligne de photosites maintenus constamment dans l'obscurité est placée sur un bord du capteur (en bas sur la figure ci-après) : c'est le **registre de sortie**. Il est connecté à un amplificateur, lui-même branché sur un système qui numérise et enregistre le signal qui en sort. Après avoir été soumis à la lumière, le capteur peut donc être représenté symboliquement par :



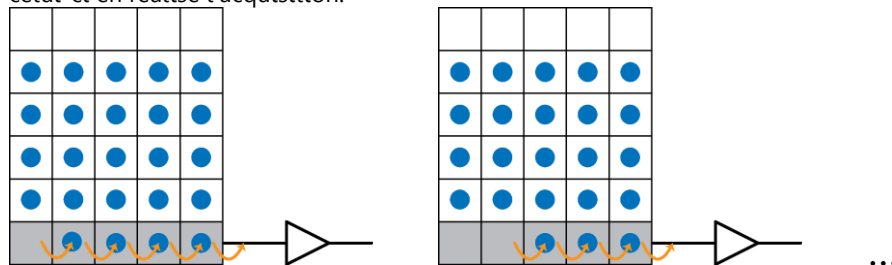
Les disques bleus indiquent la présence de charges électriques stockés par les photosites.

Une fois le capteur soumis à la lumière, voici comment est réalisée l'acquisition du signal.

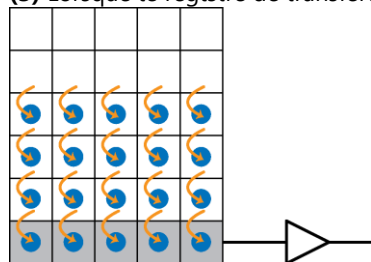
(1) Par le mécanisme de transfert de charge décrit dans le document 2, les charges de la dernière ligne sont transférées dans le registre de sortie et chacune des autres lignes et transférée dans la ligne située en-dessous.



(2) Un à un, chaque photosite du registre transfère ses charges vers le système de conversion en tension afin que celui-ci en réalise l'acquisition.



(3) Lorsque le registre de transfert a été vidé, les lignes sont à nouveau décalées vers le bas.



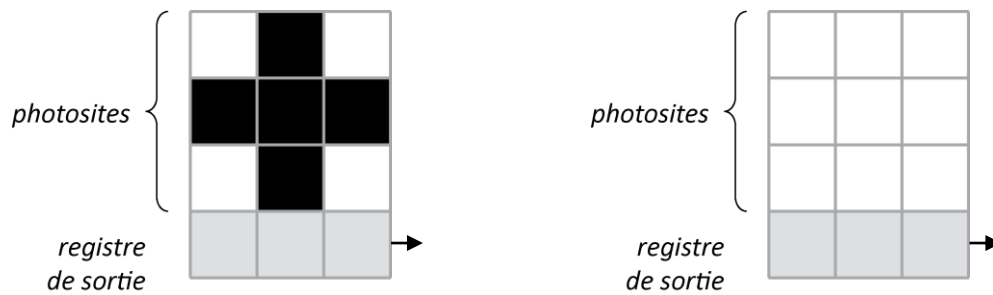
Et ainsi de suite.

La tension électrique acquise par le système branché en sortie est alors proportionnelle à la charge électrique stockée dans le photosite qui y a transféré ses charges.

4. Pourquoi les électrodes sont-elles connectées à la borne + du générateur qui les alimentent ?

5. Pourquoi le registre de sortie doit-il être placé dans l'obscurité ?

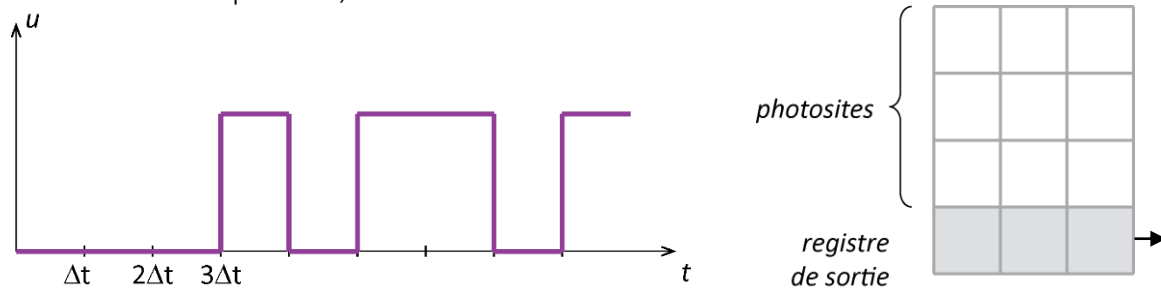
Pour en comprendre le principe, on envisage un capteur CCD simplifié à l'extrême, possédant 9 photosites (+ 3 photosites pour le registre de sortie). Il est utilisé pour photographier un "+" noir qui le recouvre en entier, comme l'illustre la figure de gauche ci-dessous.



6. Sur la figure de droite ci-dessus, écrire le symbole "-" sur les photosites qui ont stocké des charges électriques (électrons).

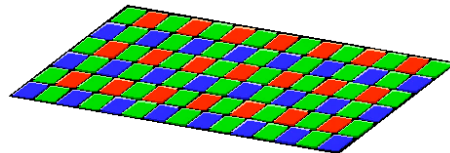
7. Une fois le transfert de charge réalisé, représenter l'allure de l'évolution temporelle du signal acquis à la sortie du registre de transfert : la tension est positive lorsque le photosite qui s'y est déchargé contenait des charges électriques et nulle sinon.

8. Si le signal acquis a l'allure ci-dessous : quelle était l'image photographiée sur le capteur (on la suppose noir et blanc comme le "+" précédent) ?



On revient à présent au capteur CCD réel qui, bien sûr, contient beaucoup plus de photosites que celui évoqué ci-dessus.

Le capteur CCD qui équipe les appareils photographiques actuels est recouvert d'un filtre de Bayer. Il a l'allure suivante :



source : Wikipédia

9. Quel est l'intérêt de ce filtre ?

On peut s'aider de la vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=Rs5ab3X9Oxo> (jusqu'à 4 min 38 s).

10. Pourquoi le filtre de Bayer contient-il deux fois plus de cellules vertes que de cellules rouges ou bleues ?

11. Un capteur CCD réel inséré dans un appareil photographique moderne haut de gamme est capable d'enregistrer 250 Mégapixels. Combien de photosites comporte-t-il ?

12. L'acquisition d'une photographie par un tel appareil dure une demi-seconde environ. Quel est la durée d'un transfert de charge ?

L'acquisition des images numériques par le capteur CCD

Liste du matériel

Dans une salle avec rideaux efficaces.

Pour chaque binôme (9 exemplaires) :

- ☐ lampe de poche (ou lampe sur pied)
- ☐ photodiode BPW34 (avec résistance de 10 k Ω intégrée)
- ☐ résistance de 1 k Ω
- ☐ câbles de connexion électrique
- ☐ multimètre (ampèremètre et voltmètre)
- ☐ générateur électrique continu réglable (2 à 3 V DC)