

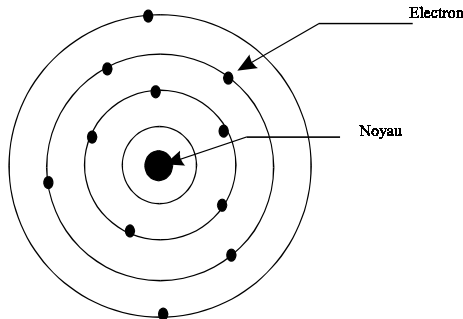
# Capteurs CCD (Charge Coupled Device)

<b>1</b>	<b>NOTION SUR LES CONDUCTEURS, SEMI-CONDUCTEURS ET ONDES LUMINEUSES .....</b>	<b>2</b>
1.1	STRUCTURE DE LA MATIERE .....	2
1.2	LES ISOLANTS.....	2
1.3	LES CONDUCTEURS.....	2
1.4	LES SEMI-CONDUCTEURS.....	3
1.4.1	<i>Les semi-conducteurs purs ou intrinsèques.....</i>	3
1.4.2	<i>Semi-conducteur extrinsèque.de type N .....</i>	3
1.4.3	<i>Semi-conducteur extrinsèque.de type P.....</i>	3
1.5	CAPACITE MOS (METAL OXYDE SEMI-CONDUCTEURS) .....	4
1.6	ONDE LUMINEUSE.....	4
1.6.1	<i>Longueur d'onde <math>\lambda</math>.....</i>	4
1.6.2	<i>Spectre lumineux : .....</i>	4
<b>2</b>	<b>CAPTEUR CCD.....</b>	<b>5</b>
2.1	PRINCIPE.....	5
2.1.1	<i>Constitution .....</i>	5
2.1.2	<i>Effet photoélectrique .....</i>	5
2.1.3	<i>Fonctionnement .....</i>	5
2.2	TRANSFERT DE CHARGE.....	6
2.2.1	<i>Principe .....</i>	6
2.2.2	<i>Transfert vers un registre a decalage analogique.....</i>	6
2.2.3	<i>restitution de l'information.....</i>	7
2.3	CONSTITUTION D'UN REGISTRE A DECALAGE .....	8
	<i>Constitution de la cellule de sortie.....</i>	8
2.4	AMELIORATIONS .....	9
2.4.1	<i>Cellule photosensible : .....</i>	9
2.4.2	<i>Vitesse de transmission : .....</i>	9
2.4.3	<i>Complexité interne : .....</i>	9
2.4.4	<i>Bibliographie.....</i>	9

# 1 NOTION SUR LES CONDUCTEURS, SEMI-CONDUCTEURS ET ONDES LUMINEUSES

## 1.1 Structure de la matière

Un atome est formé d'un noyau et d'électrons. Ces électrons gravitent autour du noyau de manière à former un nuage. En effet leur trajectoire est de forme elliptique et change tout le temps, ce qui donne cette image de nuage d'électrons. Les électrons gravitent sur une couche appelée niveau n'énergie.



Ce niveau d'énergie n'est pas tout à fait identique pour chaque électron. On parle plutôt de bande d'énergie. Entre deux bandes d'énergie une bande interdite est présente dans laquelle les électrons ne peuvent pas se situer.

On définit une bande de conduction (la plus externe) dans laquelle les électrons ne sont plus attirés par le noyau. Les électrons ont un mouvement influencé par l'agitation thermique et les champs électriques.

On définit la bande de valence comme une bande qui a des énergies (variables selon les matériaux) inférieures à celles de conduction. Les électrons gravitant dans cette bande assurent la cohésion du cristal.

C'est la bande de valence et la bande de conduction qui caractérisent les propriétés chimiques et électriques d'un matériau.

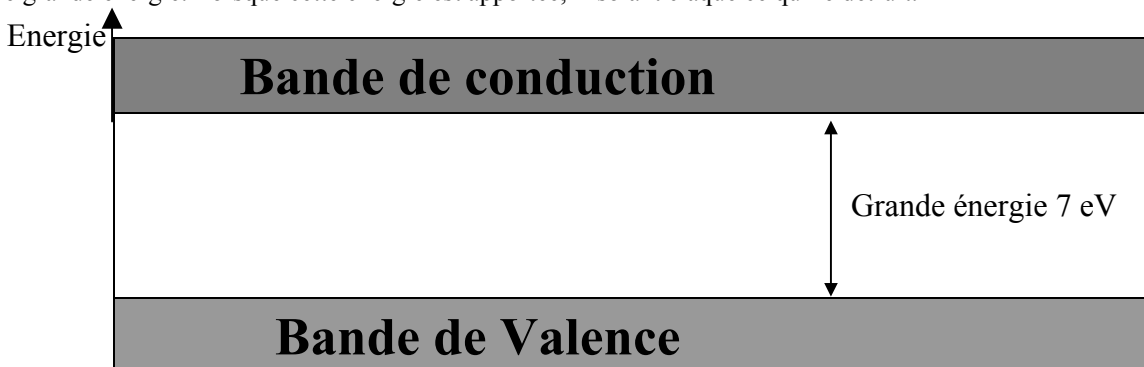
Pour qu'un électron puisse passer d'une couche à une autre supérieure, il faut lui apporter de l'énergie. Par exemple le passage de la bande de valence à la bande de conduction se fait par un apport d'énergie. Dans le sens contraire il en restitue (émission d'un photon par exemple). Le passage d'une bande à une autre ne peut se faire que si l'électron reçoit une quantité suffisante d'énergie. Il reste alors sur sa bande.

A 0°K (0 degré Kelvin= -237,8 °C) Les électrons libres ne bougent pas et n'offrent donc pas de résistance au passage du courant. A la température de 20 °C les électrons libres peuvent se déplacer librement et opposent une résistance proportionnelle à la température.

## 1.2 Les isolants

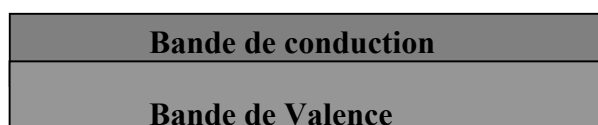
La bande de conduction est très éloignée de la bande de Valence.

Le nombre d'électrons libres dans un isolant peut-être négligé. Pour faire passer des électrons dans la bande de conduction, il faut une grande énergie. Lorsque cette énergie est apportée, l'isolant claque ce qui le détruit.



## 1.3 Les conducteurs

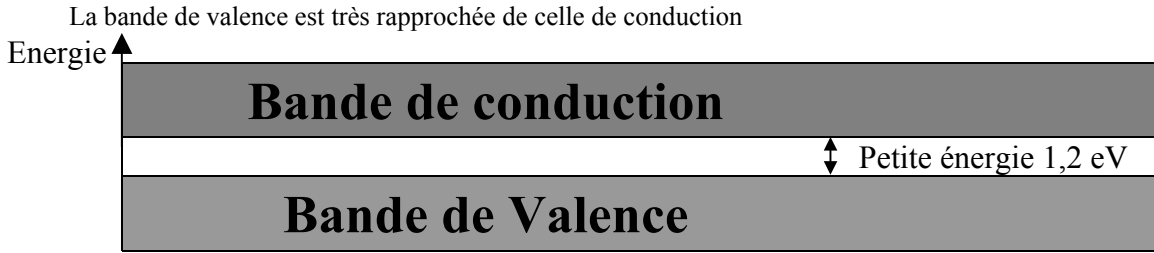
La caractéristique d'un conducteur c'est qu'une partie de la bande de valence se trouve dans la bande de conduction.



Ainsi les électrons ne servant pas à la cohésion du conducteur se retrouvent comme électron libre dans la bande de conduction, et sans apport d'énergie.

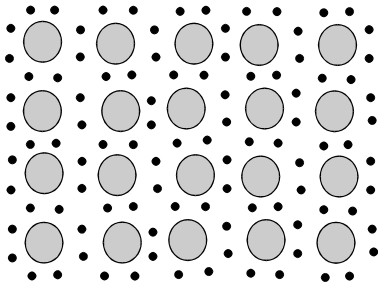
## 1.4 Les semi-conducteurs

### 1.4.1 LES SEMI-CONDUCTEURS PURS OU INTRINSEQUES



Les semi-conducteurs tels que le germanium et le silicium ont sur chaque couche de valence 4 électrons, c'est une particularité des semi-conducteurs.

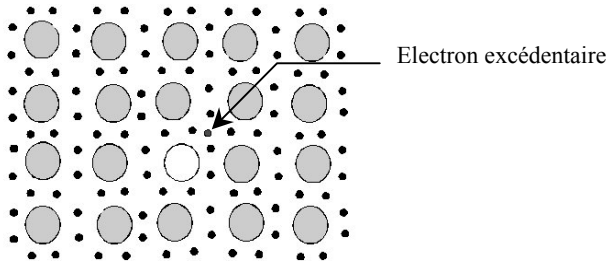
Représentation d'un atome avec seulement ses quatre électrons



On illustre ci-contre la structure d'un barreau de silicium ou germanium. Chaque électron de l'atome voisin vient se loger dans un trou. Il n'y a pas d'électron libre possible dans cette structure c'est un semi-conducteur intrinsèque

### 1.4.2 SEMI-CONDUCTEUR EXTRINSEQUE.DE TYPE N

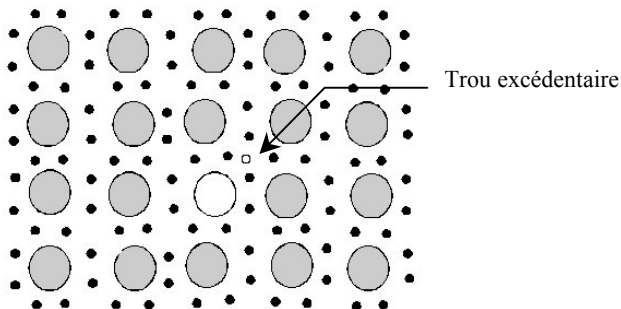
Un atome d'arsenic possède 5 électrons sur sa couche de valence. Introduit dans une structure de semi-conducteur intrinsèque cela donne le schéma suivant :



En contrôlant le nombre d'atomes d'arsenic introduits dans le barreau de silicium on va réaliser un dopage. Ici le dopage est de type N (il y a des électrons libres qui sont Négatifs). On va donc se retrouver avec des électrons libres en quantité mesurée, ceci est le domaine de la micro-électronique.

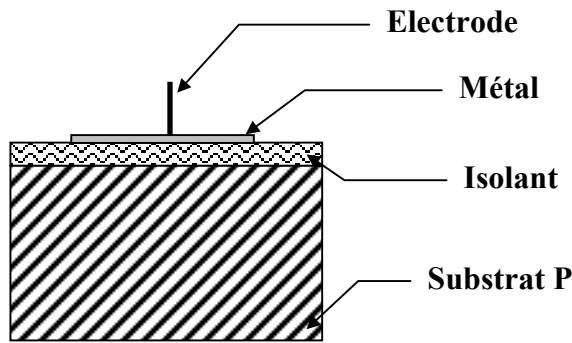
### 1.4.3 SEMI-CONDUCTEUR EXTRINSEQUE.DE TYPE P

Un atome de d'Indium possède 3 électrons sur sa couche de valence. Introduit dans une structure de semi-conducteur intrinsèque, donnera le schéma suivant :



En contrôlant le nombre d'atomes d'indiums introduit dans le barreau de silicium on va réaliser un dopage. Ici le dopage est de type P (il y a des trous libres qui sont Positifs). On va donc se retrouver avec des trous libres susceptibles de recevoir des électrons.

## 1.5 Capacité MOS (Métal Oxyde Semi-conducteurs)



Constitution :

**Substrat** : silicium dopé P (trous excédentaires)

**Isolant** : dioxyde de silicium.

**Métal** : connexion d'une électrode permettant d'appliquer un potentiel.

L'ensemble électrode isolant et substrat P forment une capacité.

L'isolant est le dioxyde de silicium de permittivité  $\epsilon_r$ .

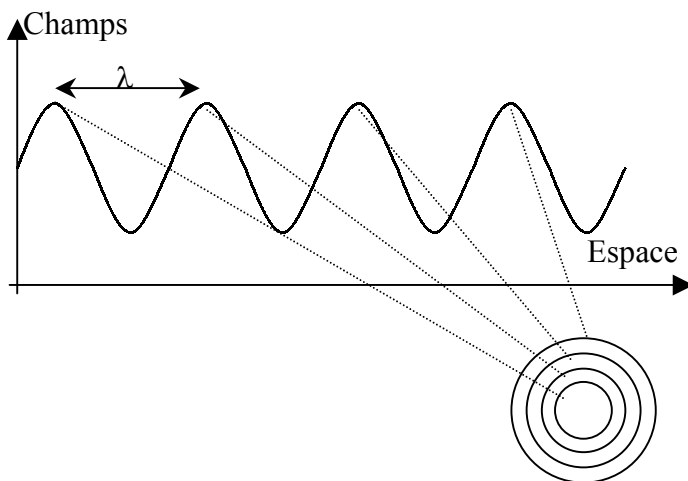
## 1.6 Onde lumineuse

La lumière présente un aspect corpusculaire; elle apparaît comme constituée de grains d'énergie appelés *photons*. L'énergie du photon est liée à sa fréquence (ou longueur d'onde) :

$$E = h\nu$$

h : constante de Planck =  $6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s  
 ν : fréquence du signal lumineux

### 1.6.1 LONGUEUR D'ONDE $\lambda$ .



La longueur d'onde représente la longueur entre 2 creux ou 2 ventres du champ. Elle est représentée dans l'espace. Pour une onde mécanique (propagation dans l'eau) on visualise à la surface un train d'onde. Les bosses correspondent au maximum de l'énergie mécanique et le plus profond des creux au minimum. La distance entre 2 maximums représente la longueur d'onde.

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

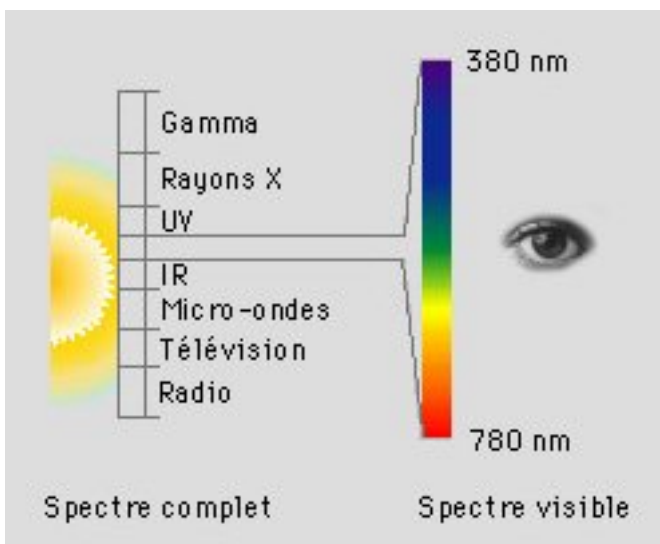
$\lambda$  longueur d'onde en m,

c célérité en m/s

ν fréquence en hertz

Dans le vide  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s = 300.000 km/s

### 1.6.2 SPECTRE LUMINEUX :



Le spectre visible va de  $\lambda = 780$  nm à  $\lambda = 380$  nm.

Du rouge/infra-rouge au violet/ultra violet.

Un rayon lumineux présente un aspect corpusculaire mais est aussi décrit par les équations de MAXWELL (description des ondes électromagnétiques).

Ainsi les photo-détecteurs permettront de mettre en évidence l'énergie corpusculaire. La propagation de la lumière est vérifiée par les équations de MAXWELL.

## 2 CAPTEUR CCD

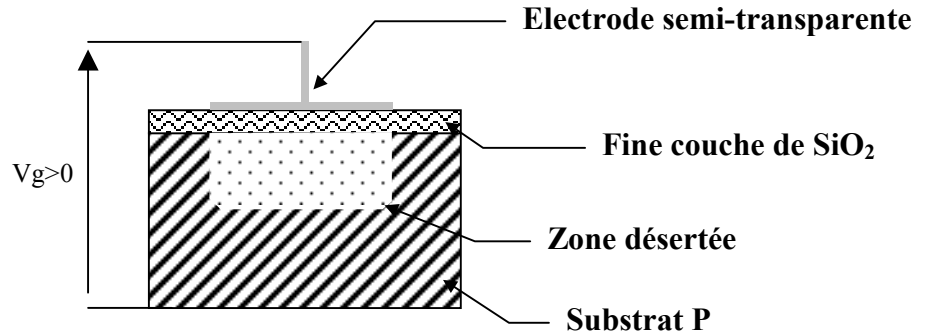
### 2.1 Principe

#### 2.1.1 CONSTITUTION

Sa cellule élémentaire est une capacité MOS (*Metal Oxyde SemiConductor*).

En appliquant une tension positive sur l'électrode, tous les excès de trous dans le substrat P sont repoussés et se réfugient en dehors d'une zone appelée zone désertée.

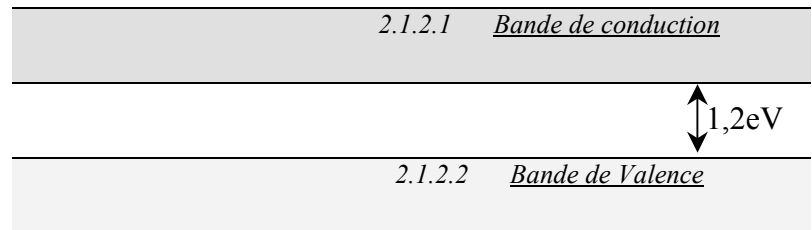
C'est un puits de potentiel où le moindre électron pourra venir se réfugier à proximité de l'isolant. Ces électrons sont issus de la couche de valence si on leur apporte l'énergie nécessaire pour atteindre la bande de conduction.



#### 2.1.2 EFFET PHOTOELECTRIQUE

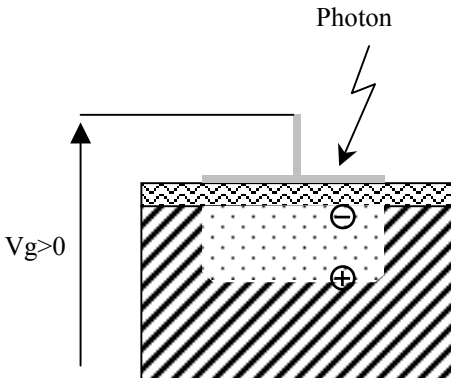
La cellule de base convertit l'illumination incidente en une quantité proportionnelle de charges électriques communément appelées « photo-charges ». L'interaction d'un rayonnement lumineux avec un semi-conducteur peut modifier l'énergie de ses électrons internes. En effet, s'il est absorbé, un photon induit le saut d'un électron d'un état occupé de la bande de valence vers un état libre de la bande de conduction.

Si l'énergie  $h\nu$  du photon est supérieure à la largeur de la bande interdite du semi-conducteur, un électron se retrouvera dans la bande de conduction. Cela entraînera un trou dans la bande de valence.



Une analyse quantitative des énergies mises en jeu montre que le silicium absorbe les rayonnements de longueur d'onde inférieure à  $1 \mu\text{m}$  environ. En-dessous de  $400 \text{ nm}$ , la limitation est principalement due à l'absorption quasi-totale du flux lumineux par les électrodes semi-transparentes.

#### 2.1.3 FONCTIONNEMENT



Lorsqu'un photon avec une énergie suffisante permet à un électron de passer dans la bande de conduction, ce dernier est attiré vers la plaque positive, le trou étant repoussé hors de la zone désertée.

L'électron est piégé sous l'isolant.

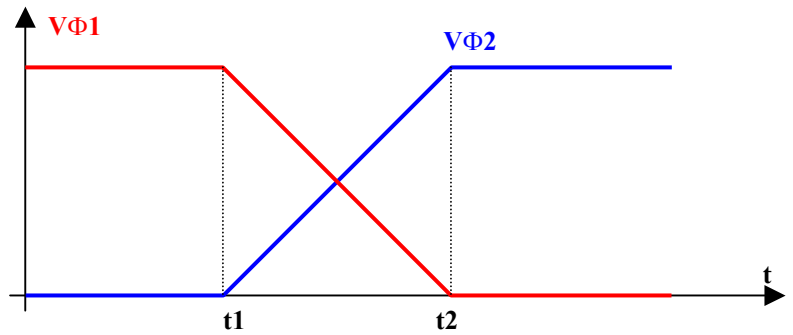
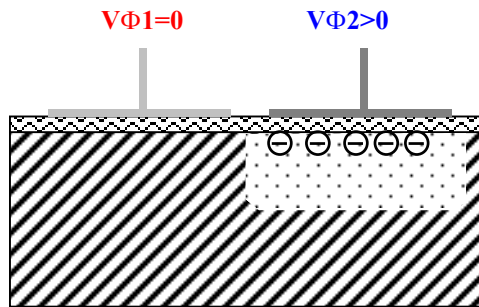
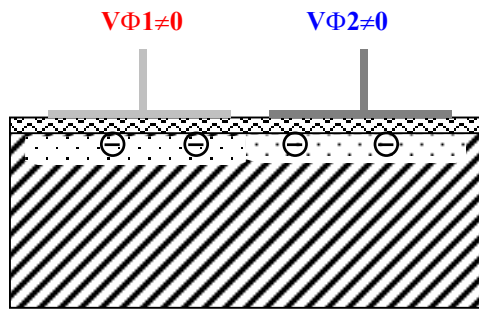
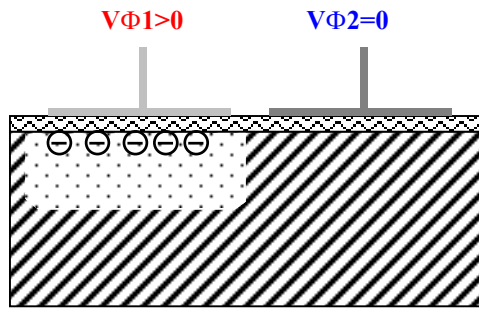
La quantité d'électrons piégé sous l'isolant est proportionnelle à la quantité de lumière reçue.

Ainsi nous avons un stockage de charge à l'image de la lumière. Il faut ensuite évacuer ces charges pour en former un signal électrique.

Pour cela on crée un système permettant le transfert de charge.

## 2.2 Transfert de charge

### 2.2.1 PRINCIPE

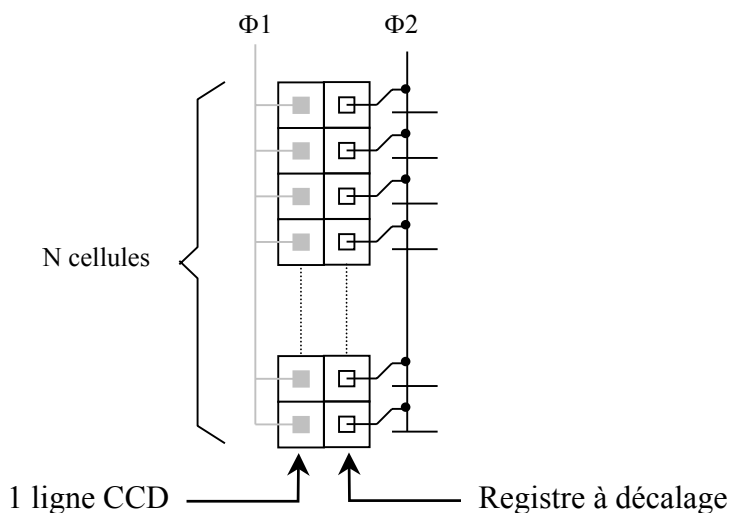


Lors de la fin d'intégration (temps d'accumulation des charges)  $t_1$ , la tension en  $V\Phi_1$  diminue alors que la tension  $V\Phi_2$  augmente jusqu'en  $t_2$ . Ceci entraîne un puits de potentiel sous  $\Phi_1$  qui diminue et sous  $\Phi_2$  qui augmente. Le potentiel en  $\Phi_2$  augmentant alors les charges s'orientent vers l'électrode  $\Phi_2$ .

On obtient ainsi un transfert de charge de l'électrode semi-transparente (recevant la lumière) vers un autre lieu.

On trouve souvent un transfert de charge à 3 électrodes. On fait passer les électrons dans un troisième puits.

### 2.2.2 TRANSFERT VERS UN REGISTRE A DECALAGE ANALOGIQUE



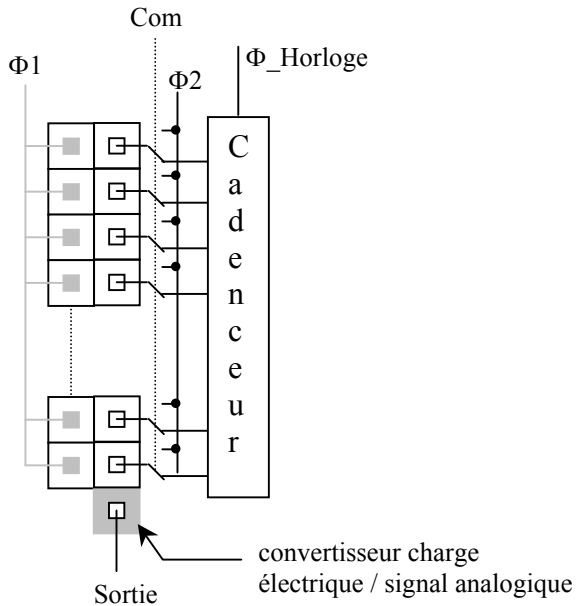
On représente ici une ligne.

Toutes les cellules ont une cellule adjacente qui permet le transfert des charges. Le transfert vers le registre à décalage s'effectue au même moment pour toutes les cellules CCD.

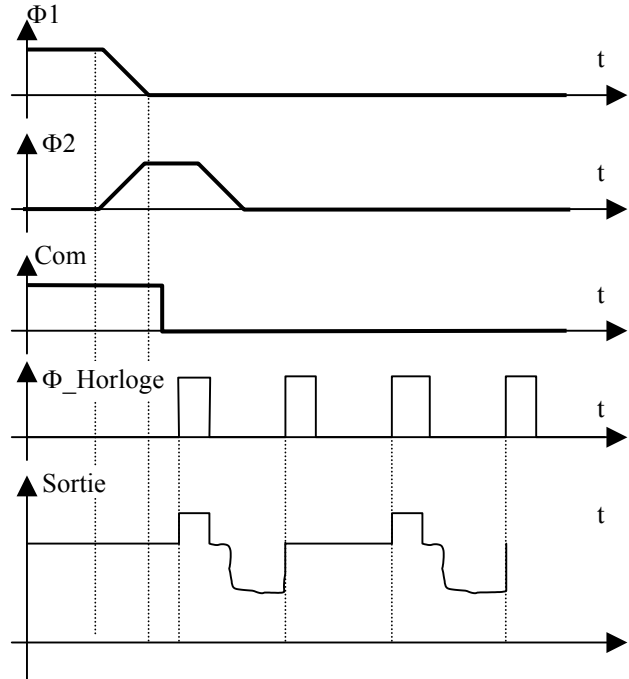
## 2.2.3 RESTITUTION DE L'INFORMATION

### 2.2.3.1 CCD 1 ligne

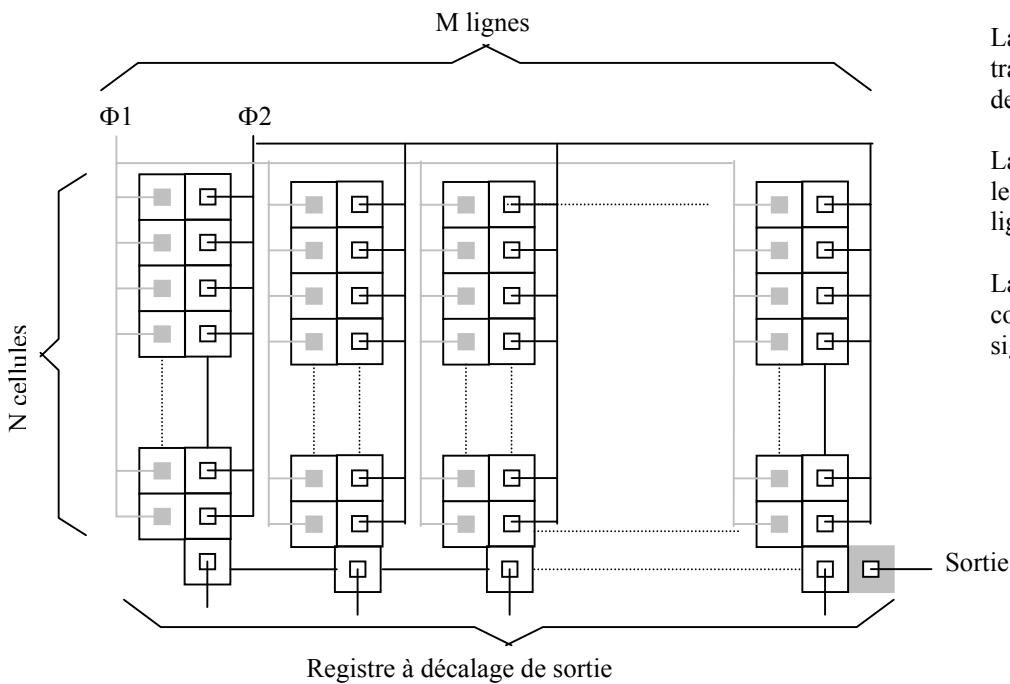
Pour un CCD à une ligne c'est le registre à décalage analogique adjacent qui sert de transfert de l'information. Au bout de ce registre il y a un convertisseur charge électrique / signal analogique.



Basé sur le principe vu précédemment les charges vont être acheminées vers la sortie par transfert de puits en puits. Cet acheminement est cadencé par une horloge. On retrouve en sortie un signal à l'image de la quantité de lumière reçue sur chaque cellule.



### 2.2.3.2 Matrice CCD



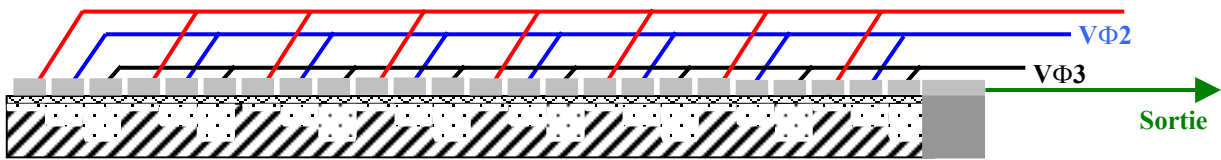
La première phase consiste toujours à transférer vers le registre adjacent le contenu des charges.

La deuxième phase consiste à transférer dans le registre à décalage de sortie la première ligne.

La troisième phase permet de transférer le contenu du registre à décalage de sortie en un signal série au rythme d'une horloge.

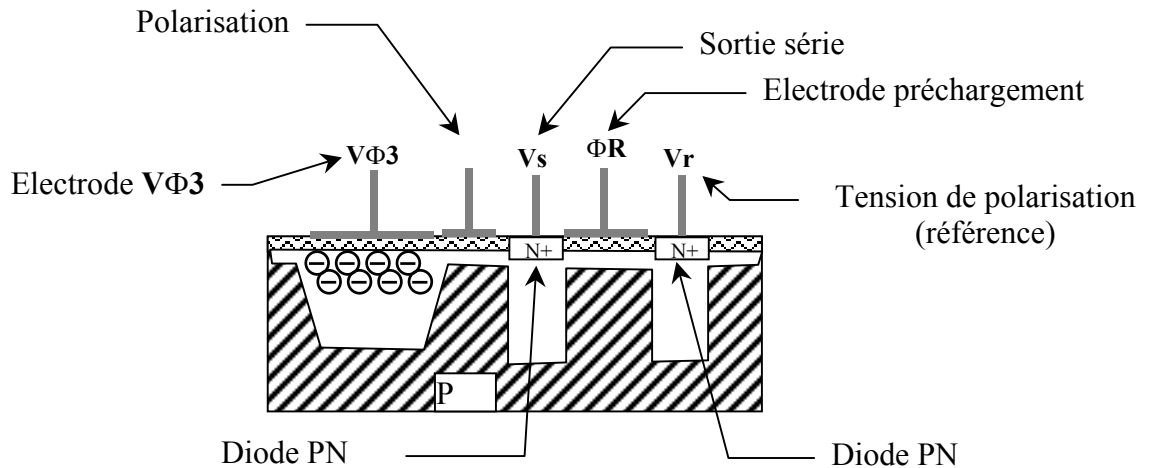
Le transfert de charge d'une cellule à une autre est de 99,9%. Ainsi, la première cellule transférée est plus fidèle que la dernière. La cellule de sortie est constituée d'un détecteur permettant la transformation de charge en signal.

## 2.3 Constitution d'un registre à décalage



La commande ici se fait sur 3 électrodes. Les commandes sur  $V\Phi$  sont effectuées de manière à transposer les charges vers la sortie.

### CONSTITUTION DE LA CELLULE DE SORTIE



**Electrode  $V\Phi3$**  : permet de commander le dernier puits de potentiel.

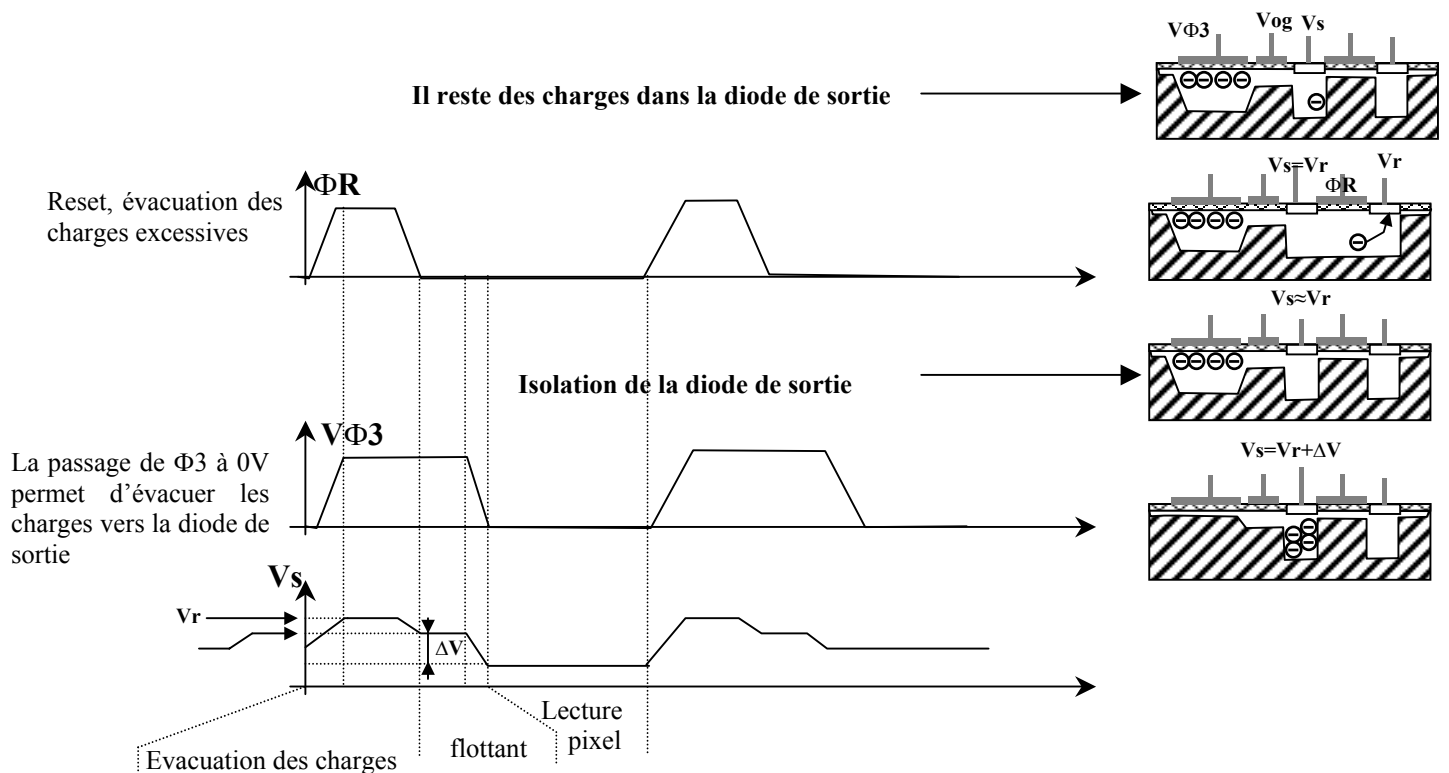
**Electrode de préchargement** : appelée ainsi elle permet d'évacuer le surplus d'électrons en portant son potentiel à une tension positive et permet d'obtenir un potentiel de référence en sortie en l'absence de charge.

**Sortie série** : elle permet de recueillir la tension à l'image des cellules.

**Polarisation** : permet d'obtenir un potentiel de référence en sortie en l'absence de charge.

**Tension de polarisation (référence)** : tension permettant d'évacuer les excès d'électrons.

**La tension de polarisation  $V_{og}$  est ajustée pour que le canal, entre l'électrode de sortie et la dernière cellule du registre à décalage soit bloquée lorsque  $\Phi3$  est au niveau haut.**



## 2.4 Améliorations

### 2.4.1 CELLULE PHOTONSENSIBLE :

La capacité du puits de potentiel, associé à chaque site photosensible, est limitée et ne peut contenir qu'un nombre fini de photocharges ( $\approx 120\ 000$  en technologie dite à « canal enterré »). Or, en sur-éclairage, le puits de potentiel est saturé et toutes les charges en excès diffusent alors vers les puits adjacents. Dès lors, il se produit un étalement de la zone suréclairée dégradant ainsi fortement l'image. Pour éviter cette diffusion, un transistor MOS d'anti-éblouissement est ajouté au voisinage de chaque photosite (figure 22). Ce dispositif se comporte de la même manière que le transistor de préchargement pour le registre de sortie.

### 2.4.2 VITESSE DE TRANSMISSION :

Afin d'accélérer les transmissions, on dispose de 2 registres à décalage analogique. L'un transportant les pixels pairs l'autre impairs. On a alors deux sorties série.

### 2.4.3 COMPLEXITE INTERNE :

Afin de simplifier la commande du capteur CCD, un capteur intègre une électronique complexe qui permet de générer les tensions permettant la commande des électrodes. La simplicité de la commande peut aller jusqu'à la génération externe de l'horloge et la commande du temps d'intégration.

### 2.4.4 BIBLIOGRAPHIE

- **Electronique 1<sup>ère</sup>** F Nathan Technique
- **Les capteurs en instrumentation industrielle** Georges - Asch et collaborateurs Dunod
- **Electronique : composants et systèmes d'application** – Thomas L. Floyd Dunod
- **Etude, réalisation et caractérisation d'une camera CCD numérique rapide (1000 images par seconde) a mémoire intégrée et pilotable par lien scsi** thèse de Manuel JUNG Université louis pasteur de Strasbourg
- **Linear sensor** Sony
- **Photodétecteur à transfert de charge (CCD)** *abcelectronique.com*  
<http://www.abcelectronique.com/dossiers/photodetecteurs/chap7.phtml>
- **Structure MOS- Dispositifs C.C.D** Bernard BOITTIAUX EUDIL  
<http://www.eudil.fr/eudil/bbsc/unip/unip700.htm>
- **Systèmes électroniques** Frederic. Gaffiot Ecole centrale de Lyon
- **Conception et réalisation d'une camera CCD** Matthieu JOMIER & Julien JOMIER CPE-Lyon  
<http://www.astrosurf.com/april>