

Capteurs optiques & Formation des images

Equipe pédagogique

- Responsable de l'UE : Olivier GODET (ogodet@irap.omp.eu)
- Intervenants :
 - O. GODET – Cours sur le fonctionnement des capteurs numériques CCD & CMOS
 - O. GODET / G. WATTIEAUX / A. COUSIN – TPs sur les capteurs CCD
 - F. LERASLE – Cours & TD sur la formation des images
 - C. EQUOY – TP sur la formation des images

Capteurs numériques CCD & CMOS

**Olivier GODET
(ogodet@irap.omp.eu)**

Organisation du cours

- Support de cours et énoncés de TP sont disponibles sur ma page web :

<http://userpages.irap.omp.eu/~ogodet/>

- 3 TPs sont prévus :
 - «[CCD fonctionnement](#)» : étude d'un CCD (Kodak AF 401) - mise en pratique du cours
 - «[CCD imagerie](#)» : appréhender l'impact sur l'imagerie numérique du fonctionnement d'un CCD (notions d'aberrations)
 - «[CCD programmation](#)» : étudier la manière dont un capteur CCD est piloté par un ordinateur. Modification du mode de lecture du CCD.

PLAN DU COURS

1 - Historique, domaine d'applications et généralités

2 - Structure d'un capteur CCD

3 - Principe de fonctionnement

4 - Les capteurs couleurs

5 - Aberrations

6 - Capteurs CMOS

Avant de commencer, avez-vous une idée de ce qu'est un CCD ou un CMOS ?

A quoi peuvent-ils servir ?

Pourquoi ces capteurs numériques présentent-ils autant d'avantages ?

Où les trouve-t-on ?

Qui les a inventé ?

1 - Historique, domaine d'application et généralités

- Les CCDs (**Charge Coupled Devices**) ont été inventées au laboratoire Bell en 1969 par George Smith and Willard Boyle.
- A l'origine, analogue à une mémoire magnétique (*magnetic bubble memory*), mais à base d'un semi-conducteur (Silicium).
- Le CCD présente de part son design des avantages certains pour faire des vidéos ou des images.
- Explosions commerciales à partir des années 80 (CCD type n)
- Prix Nobel de Physique pour les inventeurs en 2009



- Les CCDs sont/étaient utilisées dans de nombreuses applications (commerciales, médicales, scientifiques & militaires).

- Plusieurs modes de fonctionnement (vidéo, imagerie)

- Exemples :



Camescope numérique



Caméra numérique



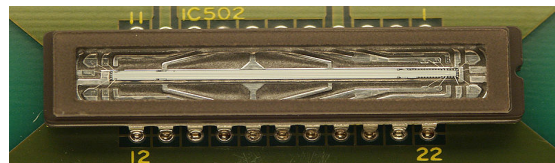
Endoscope avec un CCD



Appareil pour lire les codes barres



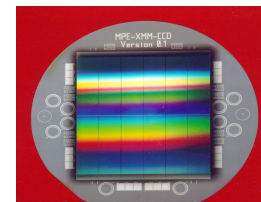
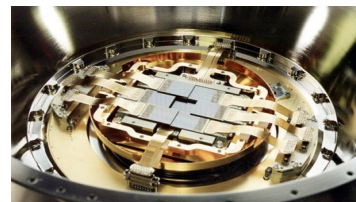
A gauche, la Toucam pro II ...
A droite, le capteur ccd à l'intérieur d'une webcam.



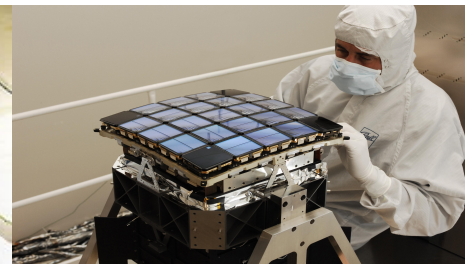
Capteur CCD (une ligne) pour les fax



Observatoires



Kepler (exo-planètes)



- Qu'est-ce que ça signifie de faire une image ?

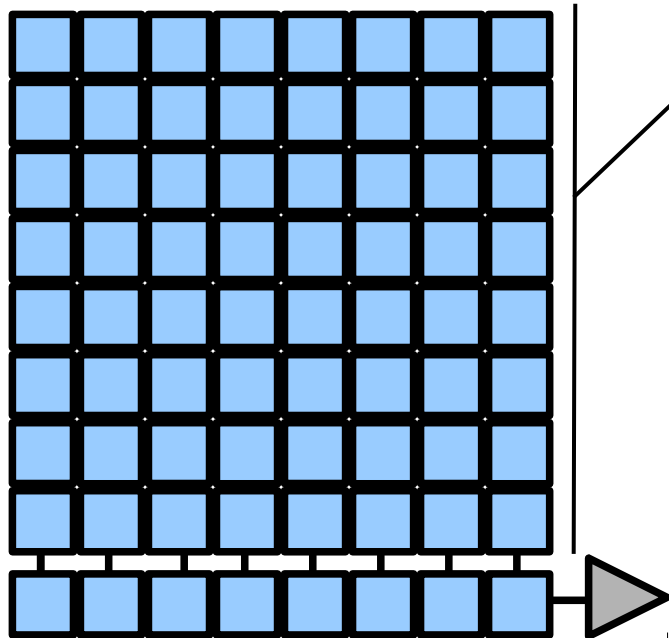
- Qu'est-ce que ça signifie de faire une image ?
 - => Echantillonner les fréquences spatiales 2D de la scène observée ou l'objet observé
- De quoi a-t-on besoin pour ce faire ?

- De quoi a-t-on besoin pour ce faire ?

=> Un détecteur photo-sensible pixelisé et d'un système optique pour focaliser la lumière sur le détecteur

2 - Structure d'un capteur CCD

- Un capteur CCD est une **matrice de photo-sites** permettant de discrétiser une scène.



Le registre peut être vertical ou horizontal.

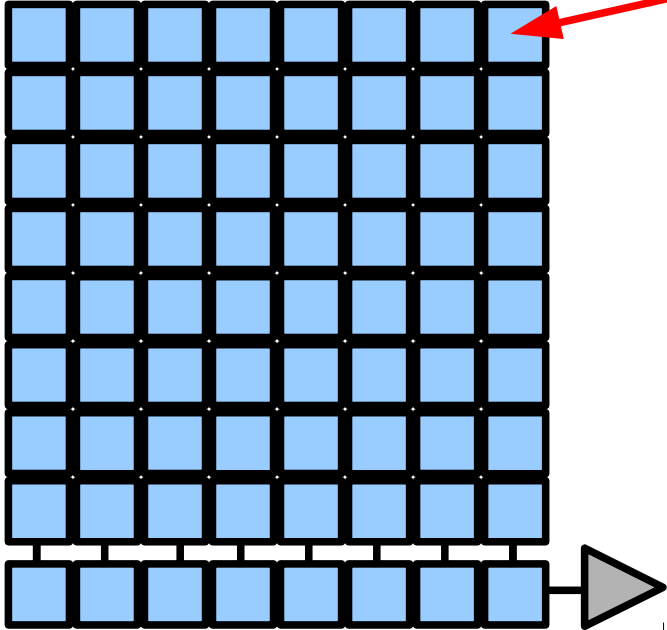
Il peut y avoir plusieurs registres.

registre

CCD pleine trame

2 - Structure d'un capteur CCD

- Un capteur CCD est une matrice de photo-sites permettant de discrétiser une scène.

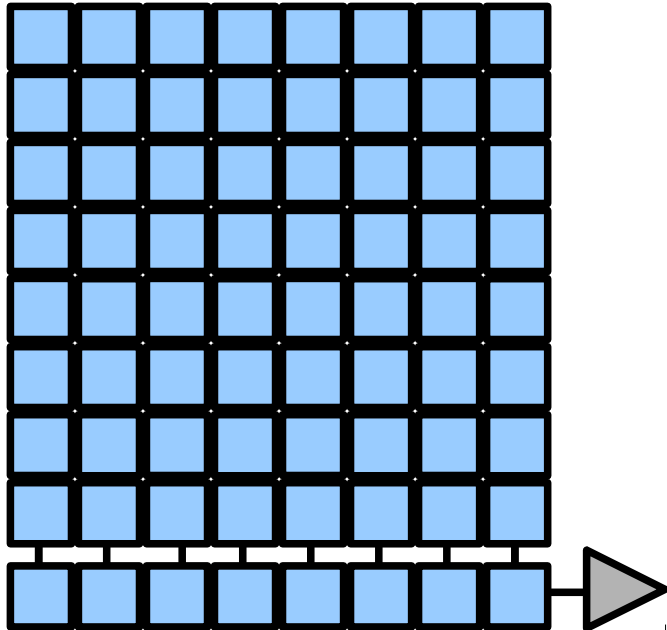


taille des photo-sites \sim qq μm à qq dizaines de μm)

=> Micro-électronique

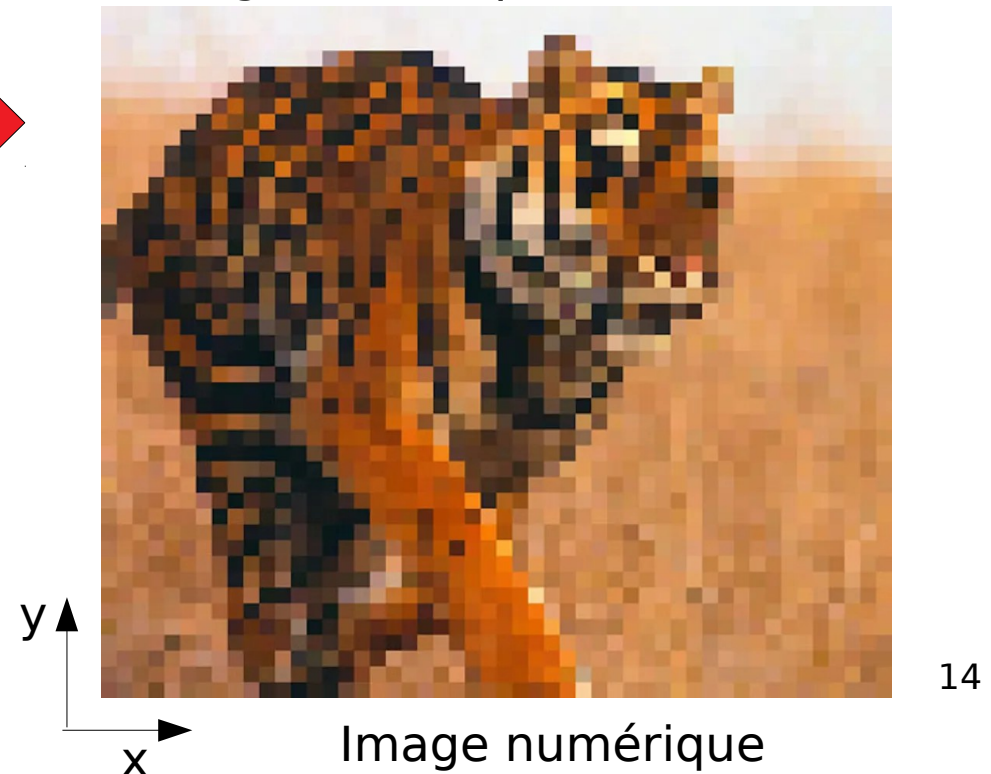
2 - Structure d'un capteur CCD

- Un capteur CCD est une matrice de **photo-sites** permettant de discrétiser une scène.

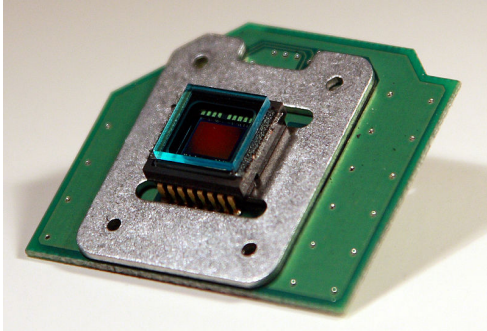


Pixel = élément de base de l'image numérique

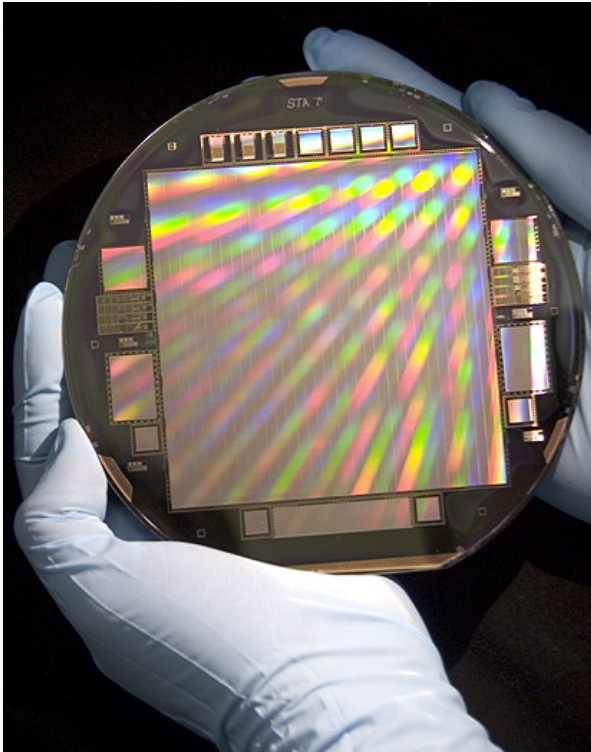
Définition = nombre de pixels en X & Y d'une image numérique



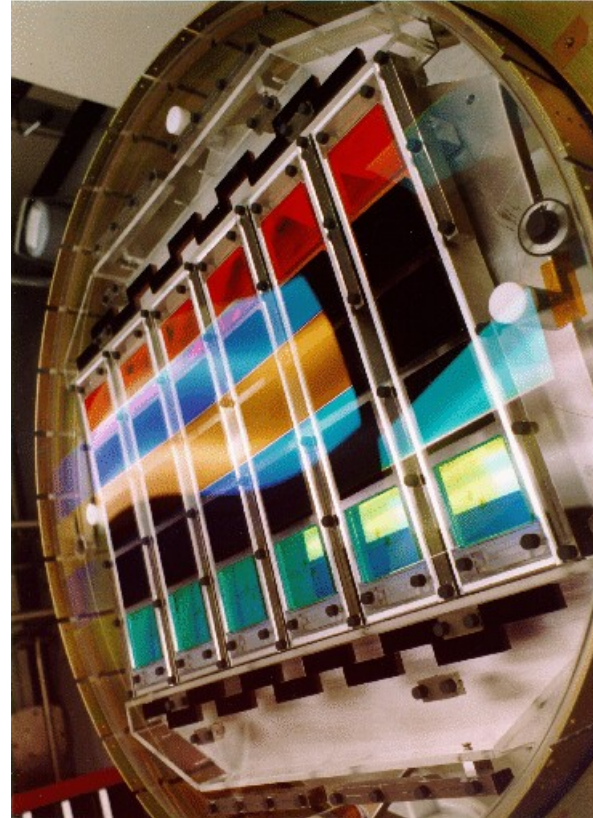
- Quelques exemples de CCDs :



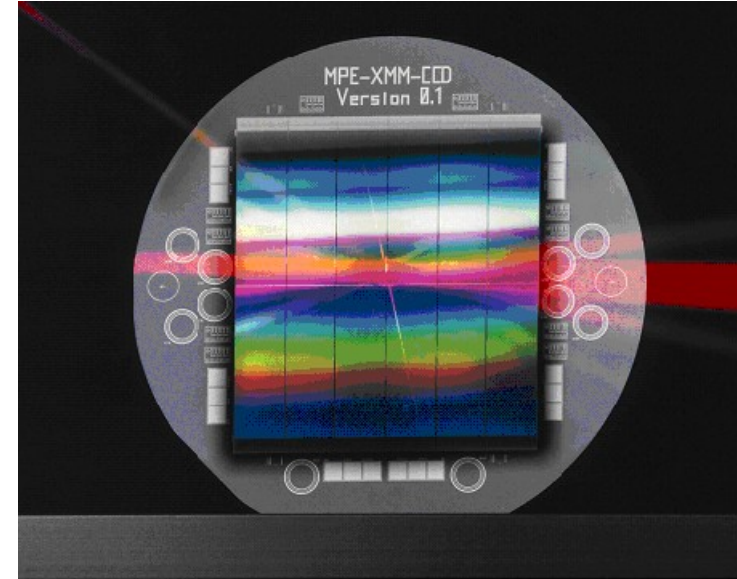
2.1 megapixel Argus CCD



CCD monolithique de 9.5 cm x 9.5 cm (112 megapixels) - projet USNO

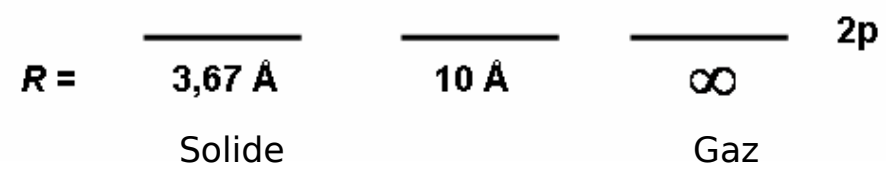
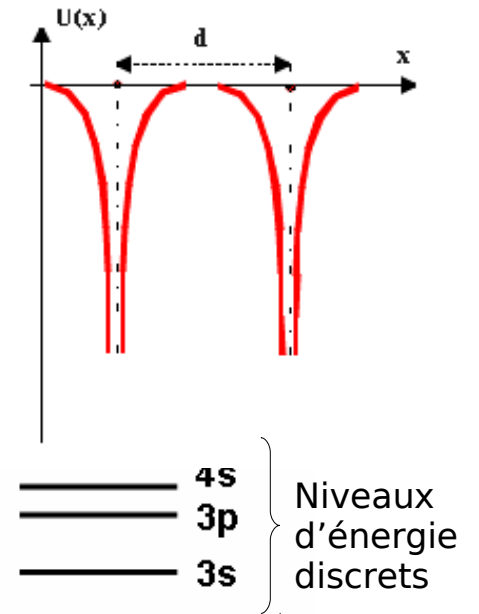
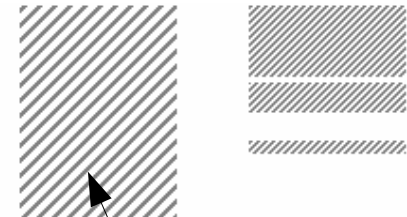
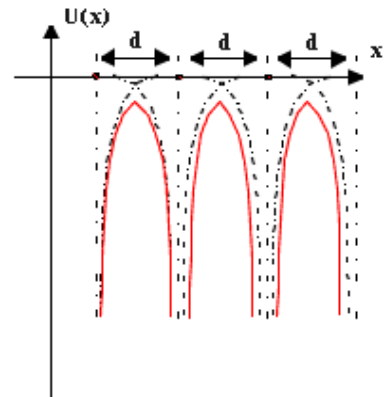
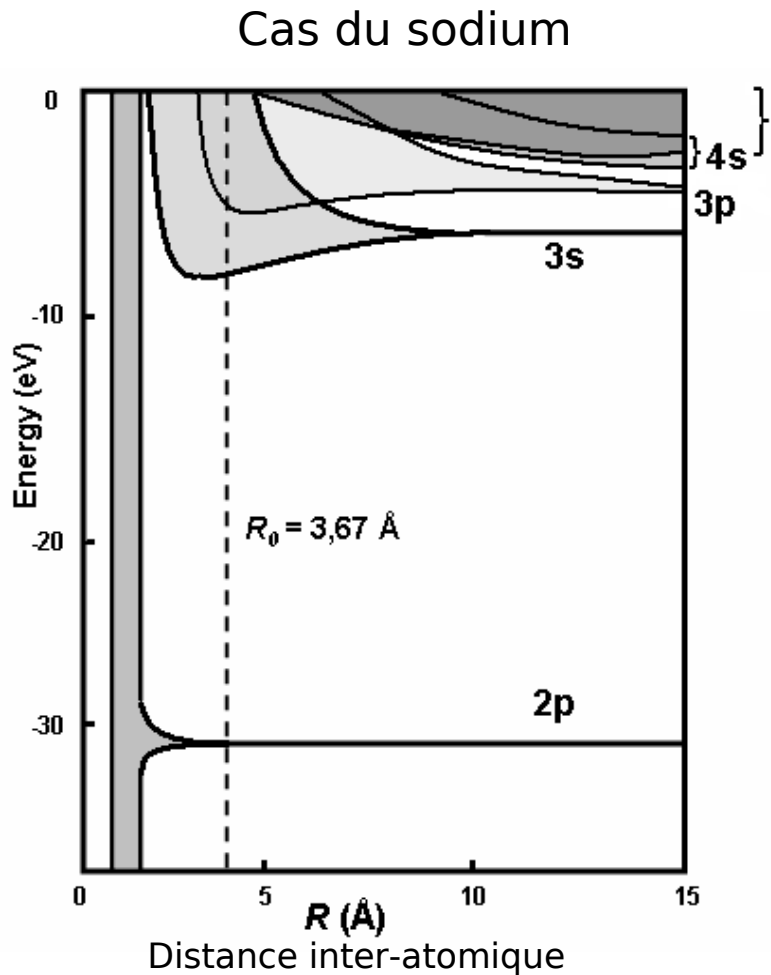


Plan focal de 30 CCD pour le télescope SLOAN

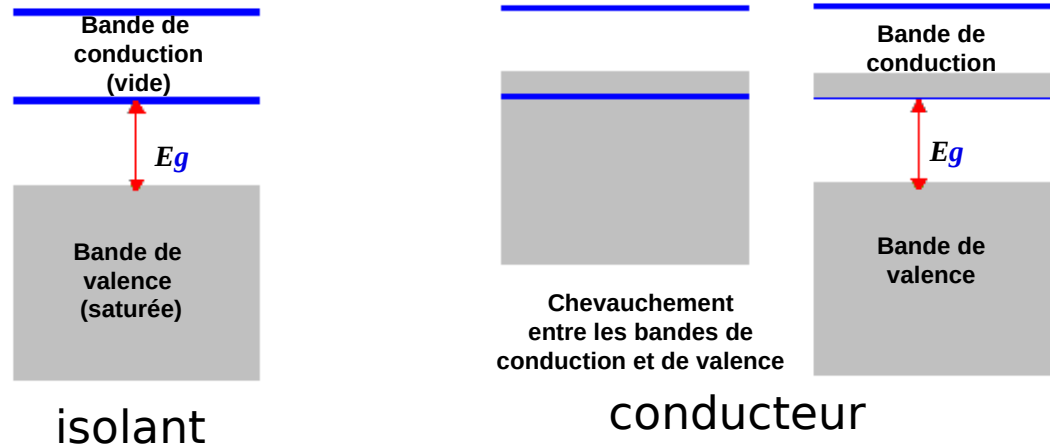


Plan focal de la caméra EPIC-pn sur l'observatoire XMM-Newton (6 cm x 6 cm)

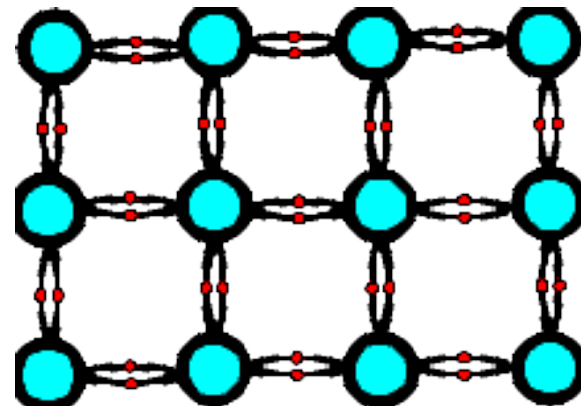
Bandes d'énergie



Silicium : semi-conducteur



- **Semi-conducteur** = propriétés intermédiaires entre isolant et conducteur / un e- puisse passer dans la bande de conduction.
- Lorsqu'un e- passe dans la bande de conduction, une "lacune" se crée dans la bande de valence. Cette "lacune" peut être assimilée à une particule virtuelle appelée **trou** (charge opposée à celle de l'e-).
- Pour le silicium, $E_g = 1,12 \text{ eV} @ 300 \text{ K}$.
- $1 \text{ eV (électron-volt)} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J (Joules)}$

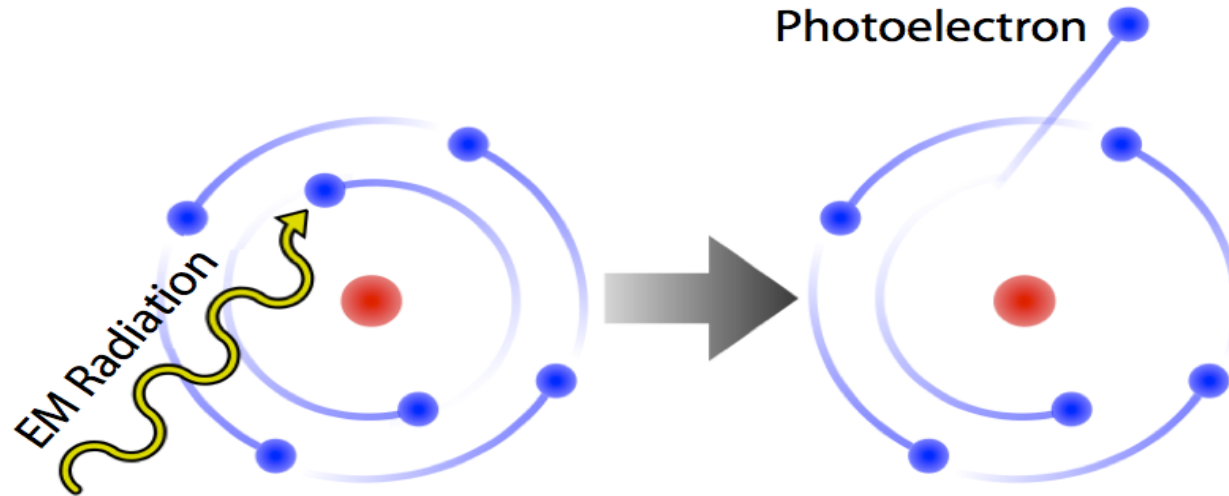


a. La génération des charges

- Les **interactions des photons** avec le **silicium du CCD** se font dans le **domaine photo-électrique**.

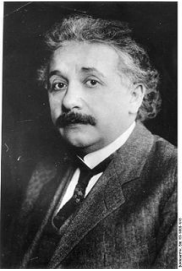


Albert Einstein

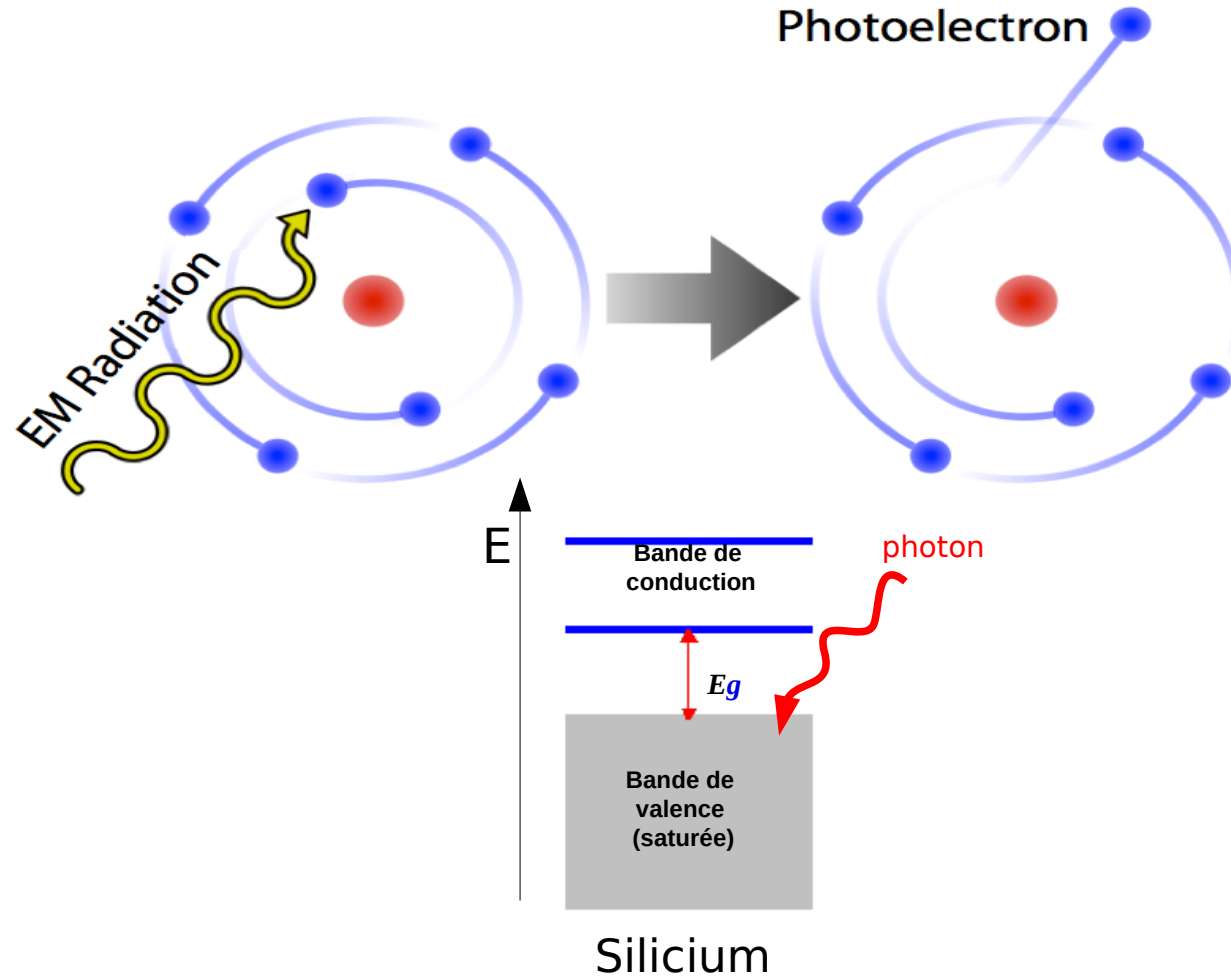


a. La génération des charges

- Les **interactions des photons** avec le **silicium du CCD** se font dans le **domaine photo-électrique**.



Albert Einstein

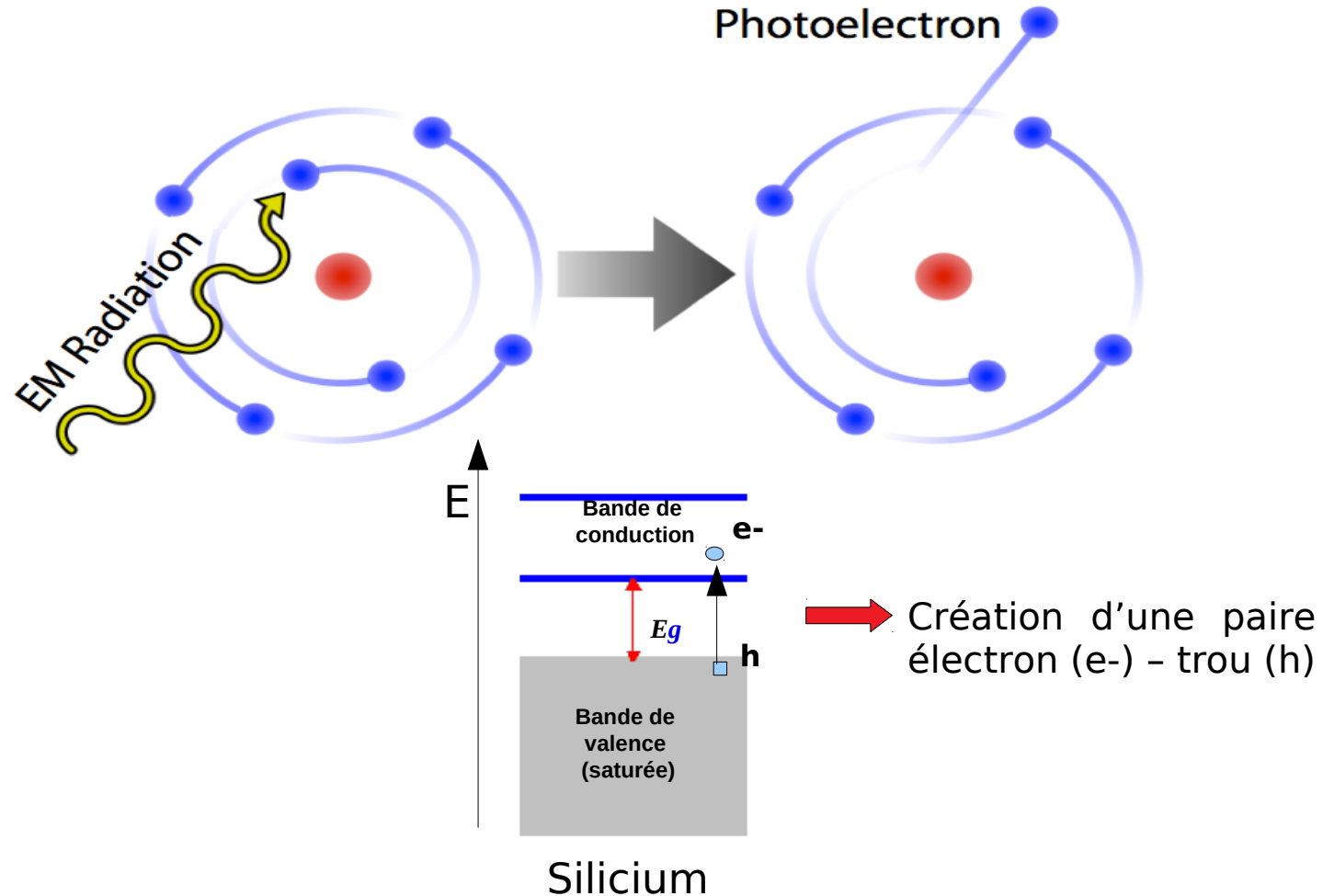


a. La génération des charges

- Les **interactions des photons** avec le **silicium du CCD** se font dans le **domaine photo-électrique**.



Albert Einstein



a. La génération des charges

- Les **interactions des photons** avec le **silicium du CCD** se font dans le **domaine photo-électrique**.
- Lors de ces interactions, un photon cède toute son énergie à un électron appartenant à un atome de silicium.
- Ceci donne naissance à une ou plusieurs **paires électron (e-)/trou (h)** dépendant de l'énergie du photon incident.

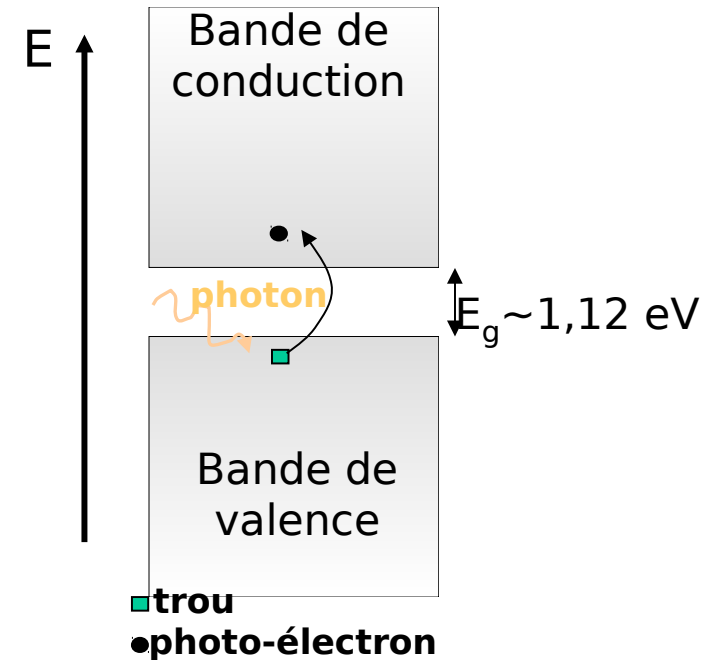
Question : A partir de quelle énergie est-il possible de former des photo-électrons ?

a. La génération des charges

- Les **interactions des photons** avec le **silicium du CCD** se font dans le **domaine photo-électrique**.
- Lors de ces interactions, un photon cède toute son énergie à un électron appartenant à un atome de silicium.
- Ceci donne naissance à une ou plusieurs **paires électron (e-)/trou (h)** dépendant de l'énergie du photon incident.
- Pour former des photo-électrons, il faut que :

$$E = h\nu > E_g$$

i.e. $\lambda < 1,1 \mu\text{m}$

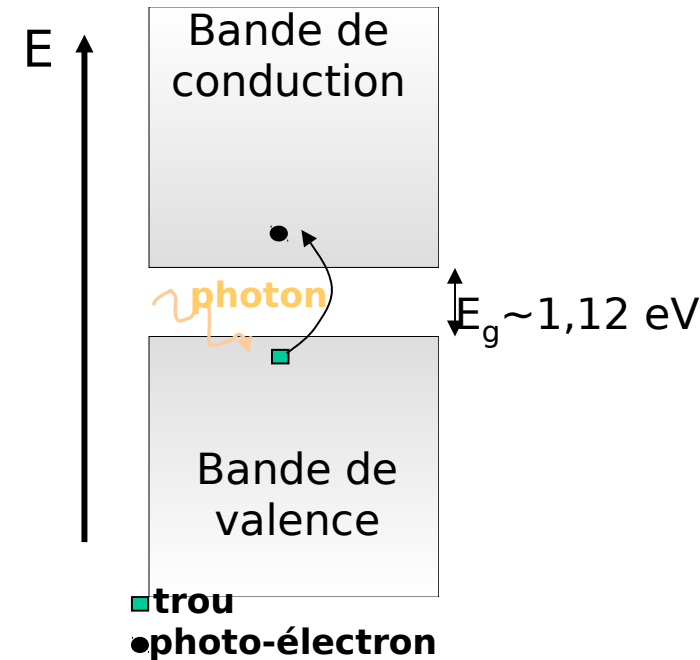


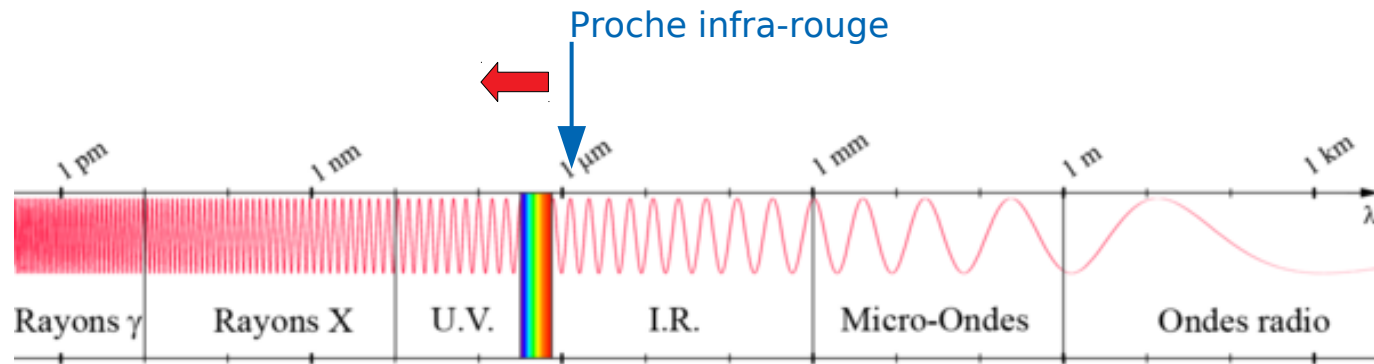
a. La génération des charges

- Les **interactions des photons** avec le **silicium du CCD** se font dans le **domaine photo-électrique**.
- Lors de ces interactions, un photon cède toute son énergie à un électron appartenant à un atome de silicium.
- Ceci donne naissance à une ou plusieurs **paires électron (e-)/trou (h)** dépendant de l'énergie du photon incident.
- Pour former des photo-électrons, il faut que :

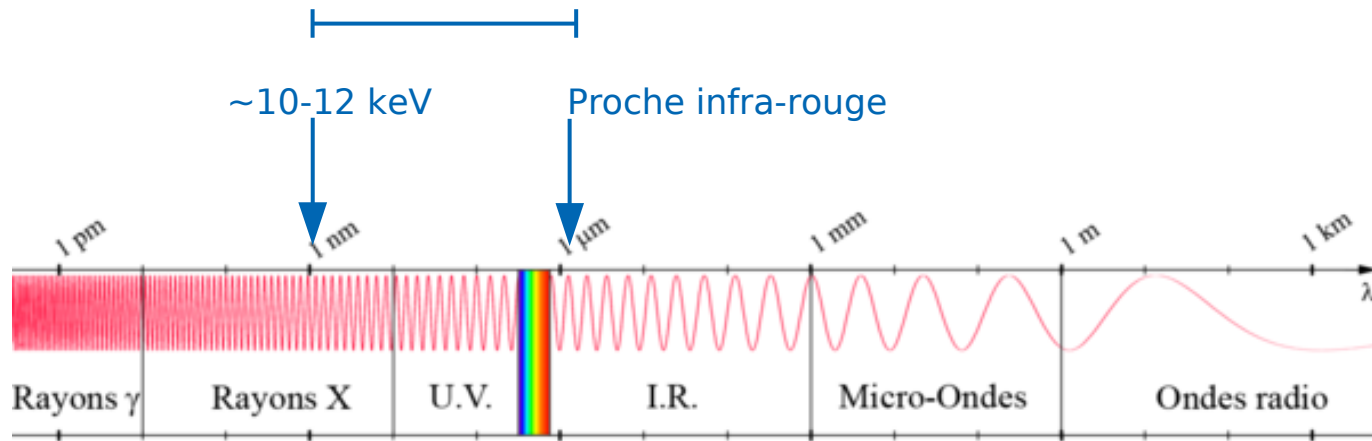
$$E = h\nu > E_g$$

i.e. $\lambda < 1,1 \mu\text{m}$





3 ordres de grandeur



- A quoi le CCD est-il sensible dans le domaine visible ?

- A quoi le CCD est-il sensible dans le domaine visible ?

=> **Un photon visible crée au plus une paire électron/trou.** Donc le CCD n'est pas sensible à l'énergie des photons incidents, seulement à **l'intensité** (flux de photons).



Image numérique en dégradé de noir & blanc

- A quoi le CCD est-il sensible dans le domaine visible ?

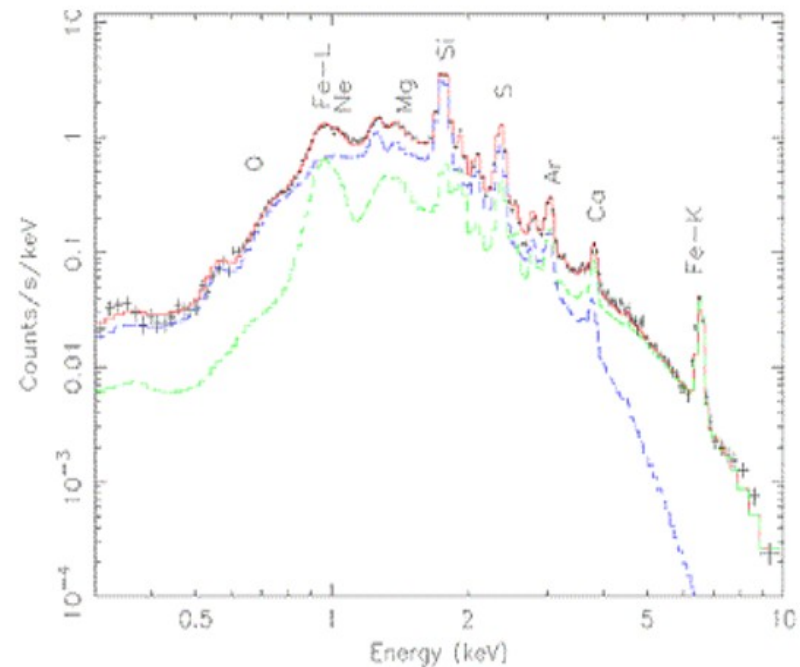
=> **Un photon visible crée au plus une paire électron/trou.** Donc le CCD n'est pas sensible à l'énergie des photons incidents, seulement à **l'intensité** (flux de photons).

- Et dans le domaine des rayons X ?

- Et dans le domaine des rayons X ?

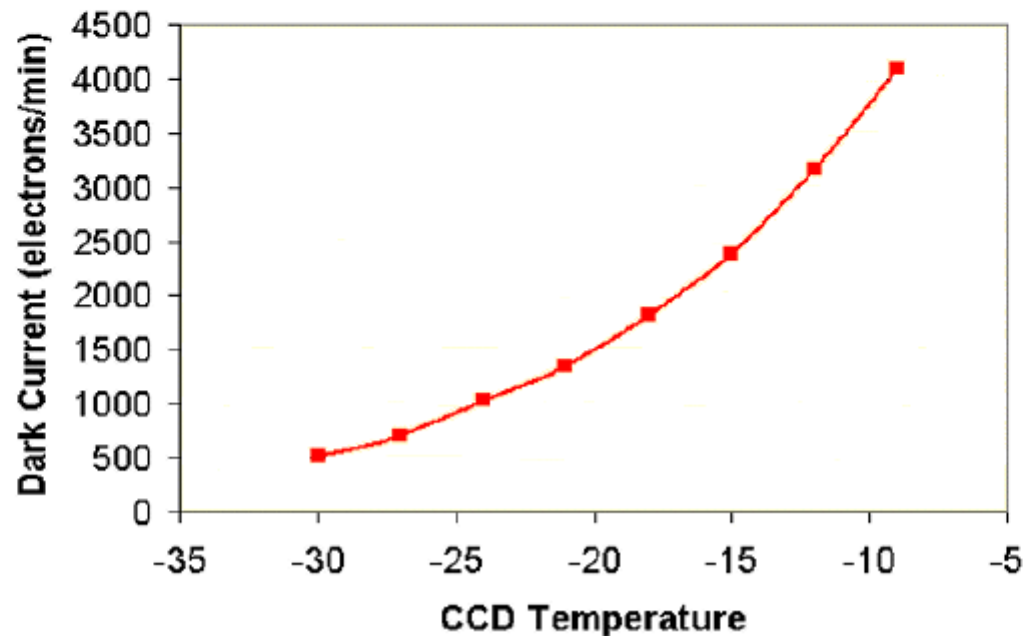
=> Le photo-électron (électron ayant absorbé le photon) part avec une énergie cinétique conséquente → collisions coulombiennes avec d'autres électrons => **création d'un nuage de charges** autour de la position d'interaction initiale du photon

=> Si la chaîne de lecture est capable de compter les interactions des photons incidents, **possibilité de mesurer l'énergie de chaque photon => spectro-imagerie**



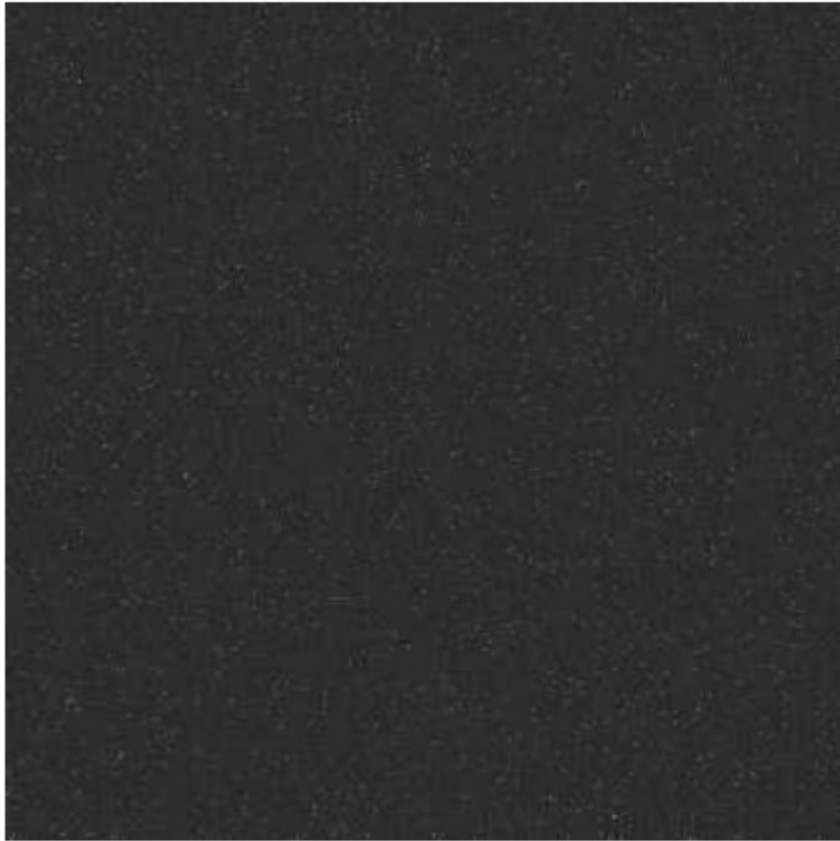
- A part la lumière, quel autre mécanisme permettrait de produire des paires e^-/h^+ ?

- Des paires e^-/h vont également être produites par agitation thermique.
- Ces paires constituent un bruit par rapport au signal utile que sont les photo-électrons.
- Ce bruit thermique est appelé courant d'obscurité (*dark current*).
- Il augmente de manière exponentielle avec la température.

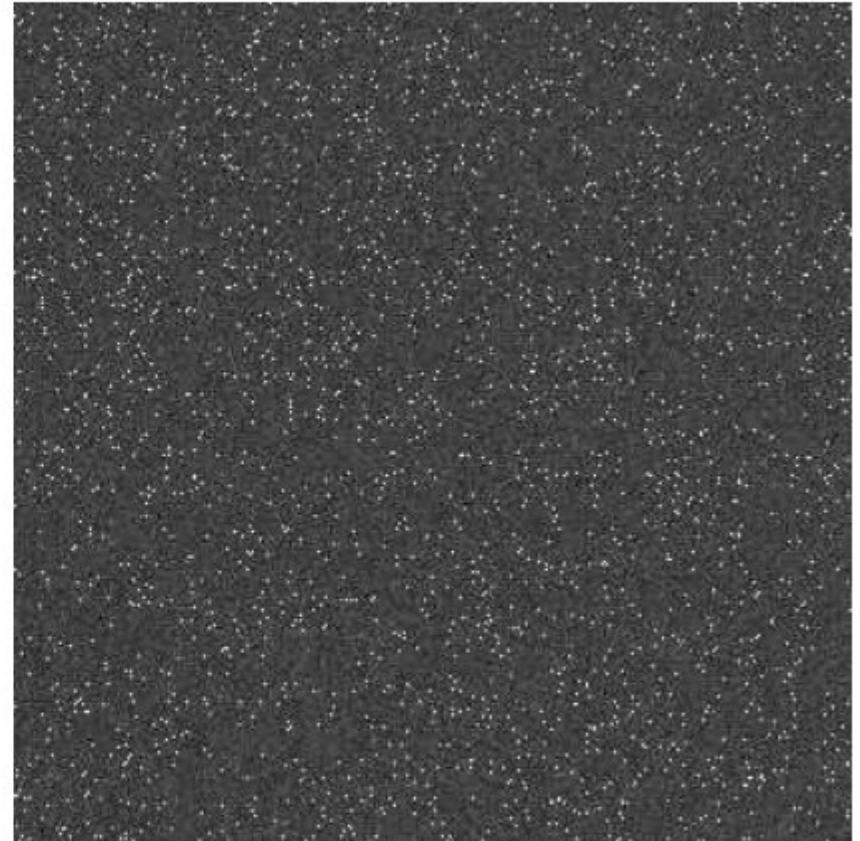


Exemple de "darks" (images acquises sur 300s à 10 min d'intervalle)

Images formées sans lumière



T_0 (mise ON)

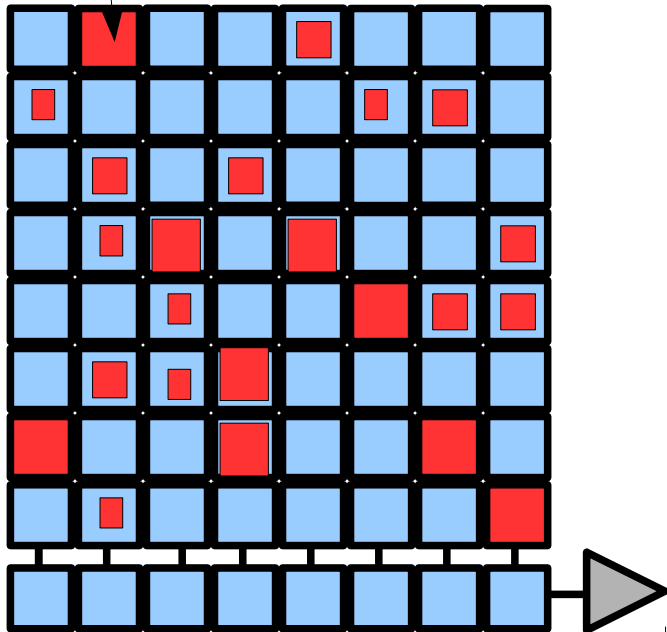


$T_0 + 10$ mins
(utilisation sans contrôle de
la température)

- **Pour résumer :**

Les photons provenant de la scène observée vont créer des paires électrons-trous dans chaque photo-site de la matrice active.

A ce signal va s'ajouter un signal de bruit : les paires électron-trou produites par agitation thermique.



- Une fois les charges (e- & h) créées, que doit-on faire ?

- Une fois les charges (e- & h) créées, que doit-on faire ?
 - => Séparer les charges (électrons & trous) avant qu'elles ne recombinent : **collection des charges**
- Comment peut-on faire cela ?

- Une fois les charges (e- & h) créées, que doit-on faire ?

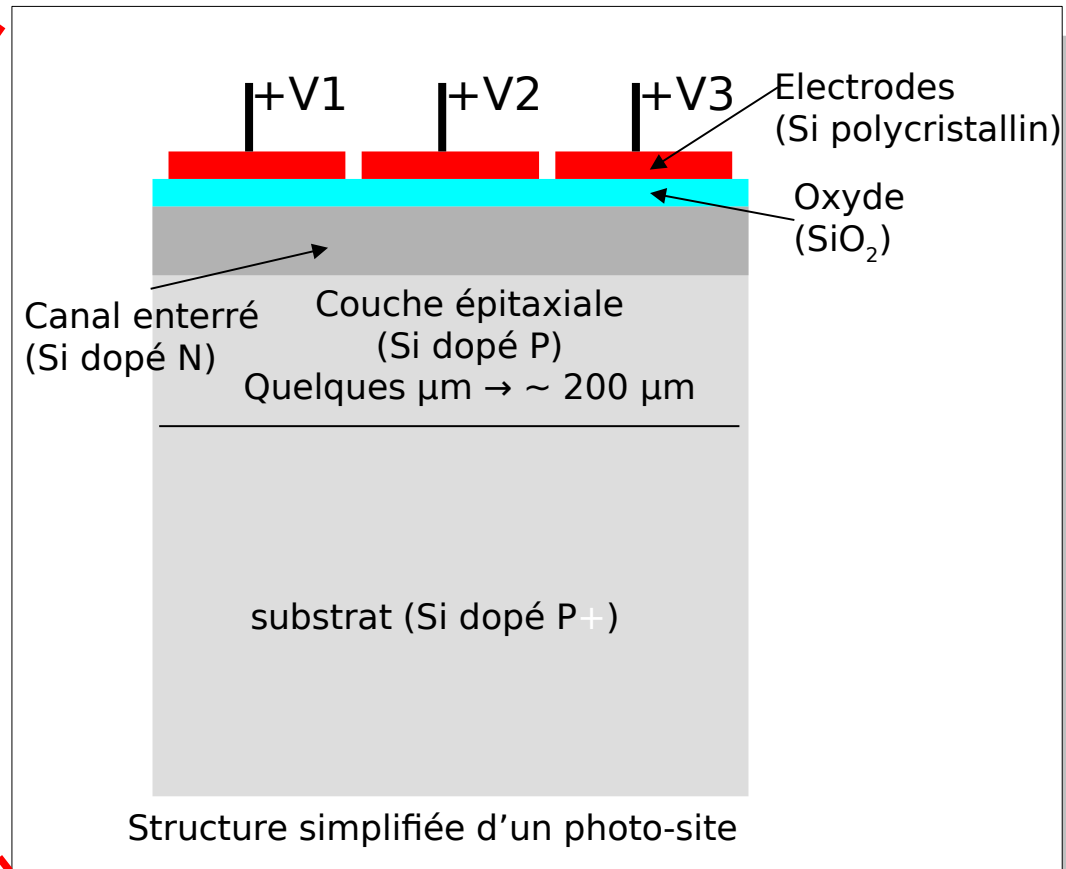
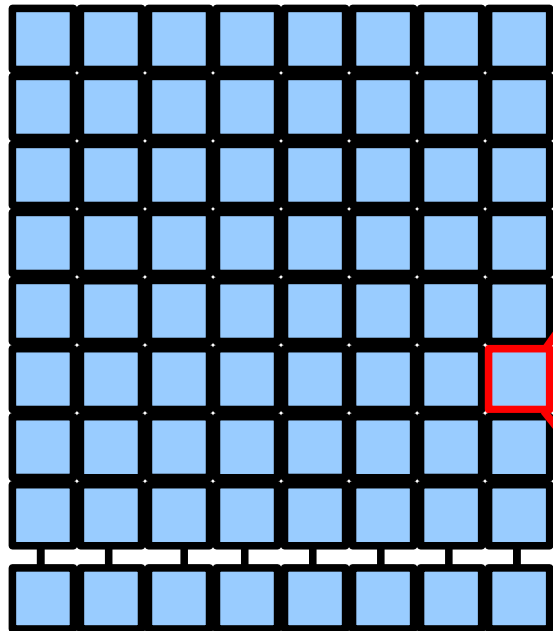
=> Séparer les charges (électrons & trous) avant qu'elles ne recombinent : **collection des charges**

- Comment peut-on faire cela ?

=> **Création d'un champ électrique \vec{E}** dans la profondeur de chaque photo-site => Présence d'électrodes à la surface de chaque photo-site

Collection des charges

- Photo-site = Cellule photo-sensible

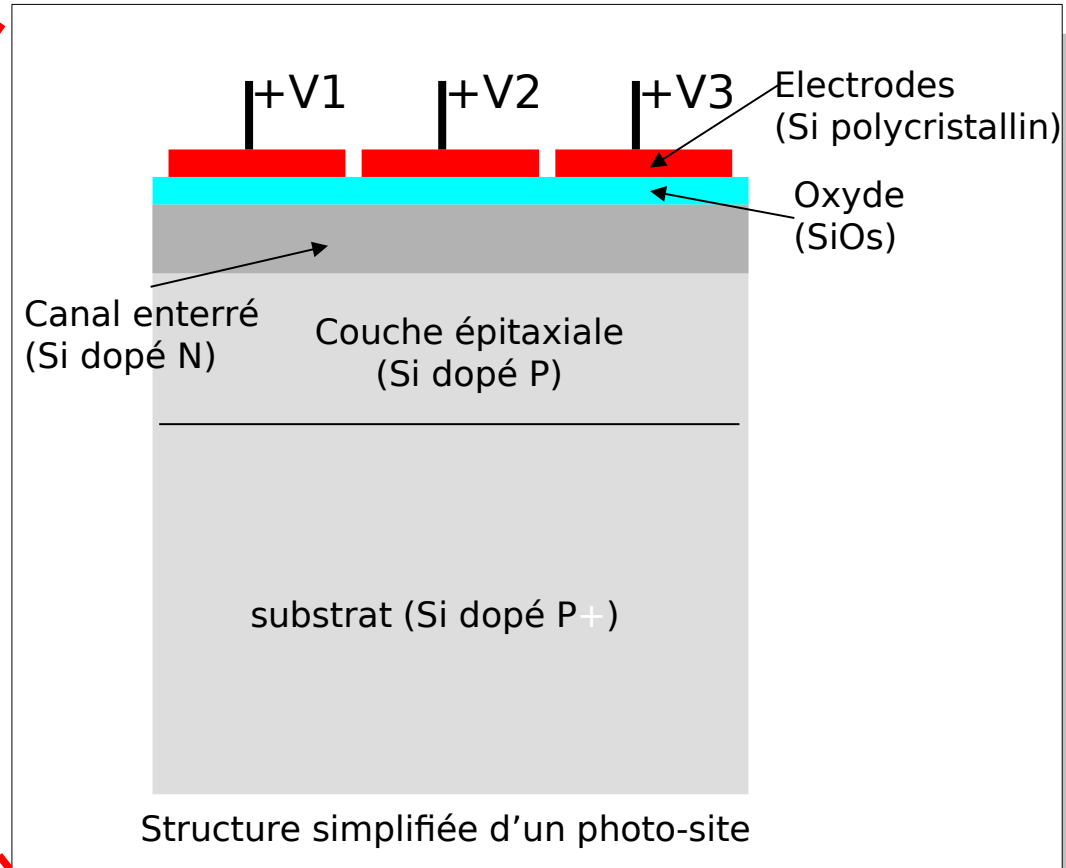
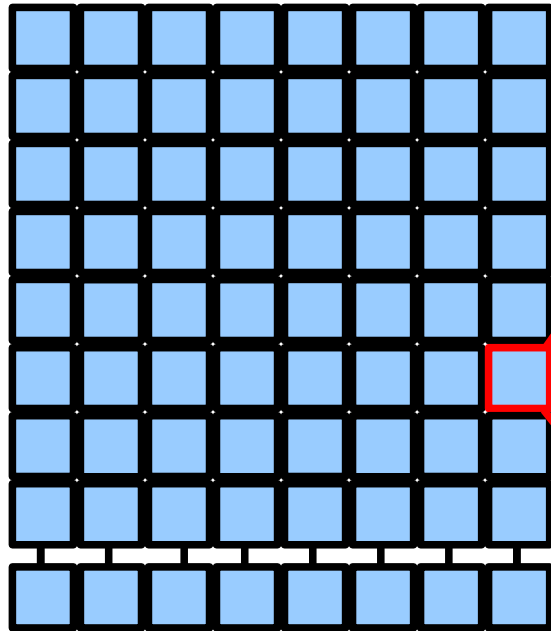


Epaisseur du CCD < 1-2 mm

- Un photo-site est une **cellule MOS (Metal/Oxyde/Silicium) polarisable**.
- **Phase = électrode**
- CCDs 2, 3, 4 phases voire 64 phases !

Collection des charges

- Photo-site = Cellule photo-sensible



Vue en coupe d'un CCD 3 phases

Epaisseur du CCD < 1-2 mm

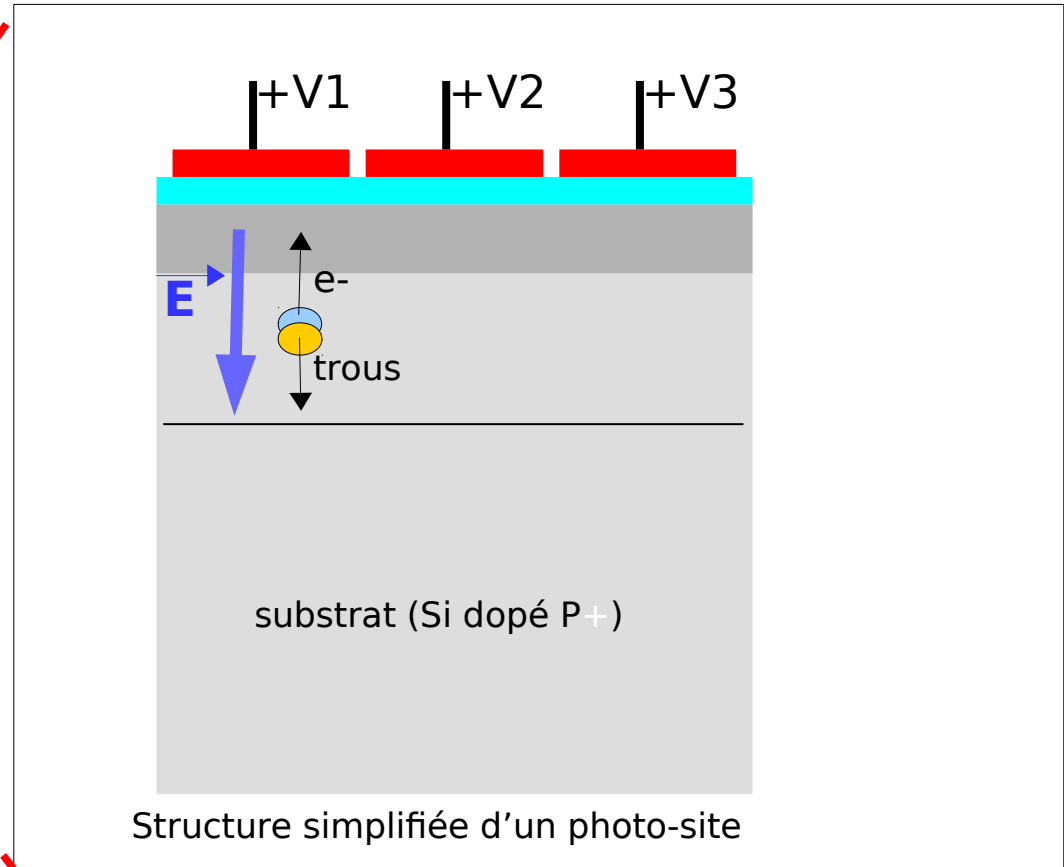
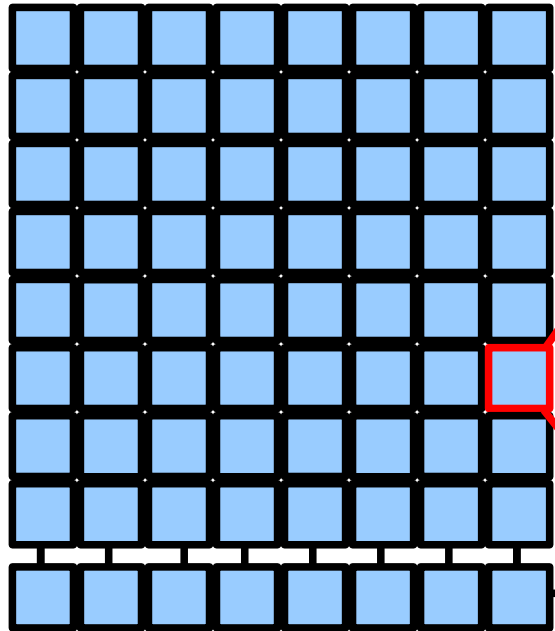


Electrode
Couche d'oxyde
Si (volume sensible)

POLY 1 POLY 3 POLY 2 POLY 1

Collection des charges

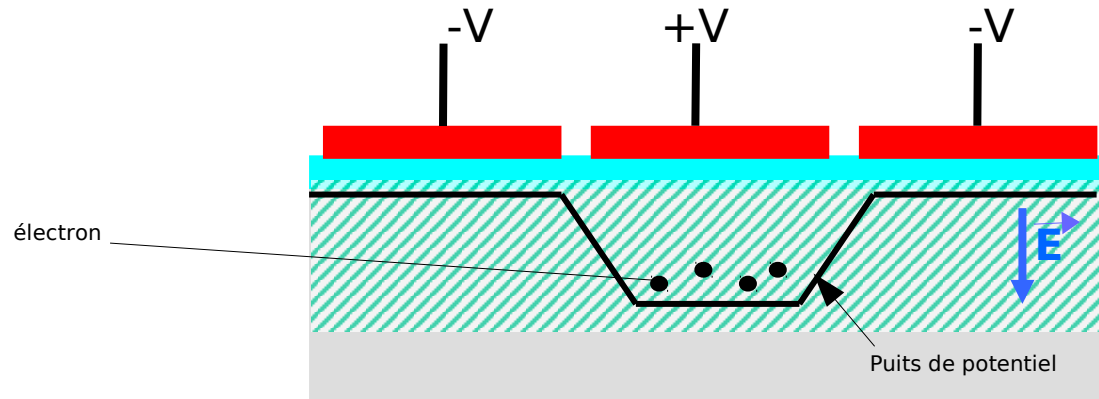
- Photo-site = Cellule photo-sensible



Epaisseur du CCD < 1-2 mm

Stockage des charges

- Pour éviter la diffusion thermique des électrons d'un photo-site, polarisation différente des électrodes de surface pour créer un **puits de potentiel par photo-site** qui va permettre de **stocker les électrons**.



Stockage des charges

- La **capacité des puits de potentiel** peut aller de quelques 10^4 à 10^7 électrons (voire plus).
- La **dynamique** d'un CCD correspond au rapport entre l'objet le plus brillant et l'objet le plus faible visibles simultanément dans une scène.



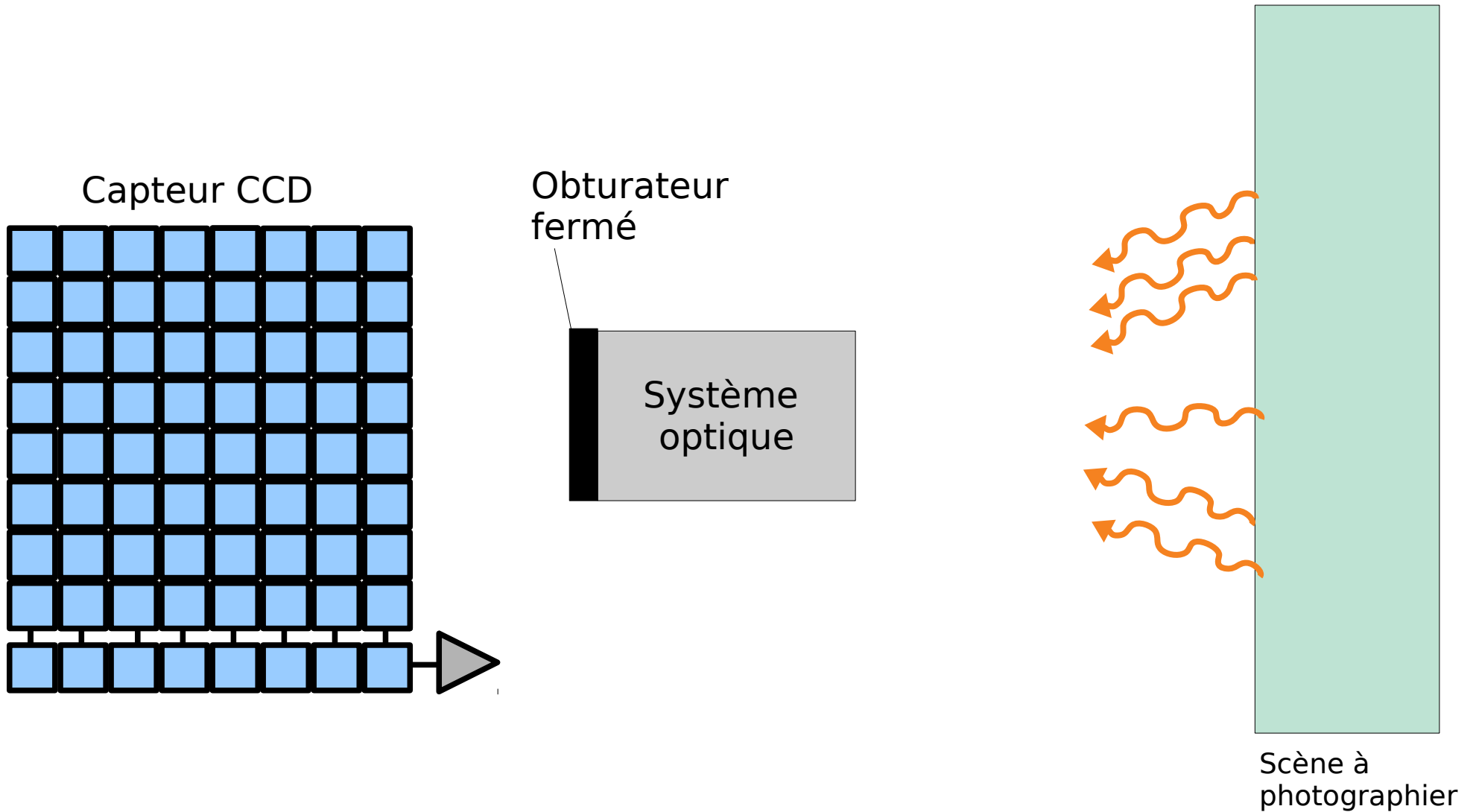
Image d'une clairière
(zones sombres et lumineuses)

- Plus le puits de potentiel est grand et plus la gamme dynamique du CCD est grande.

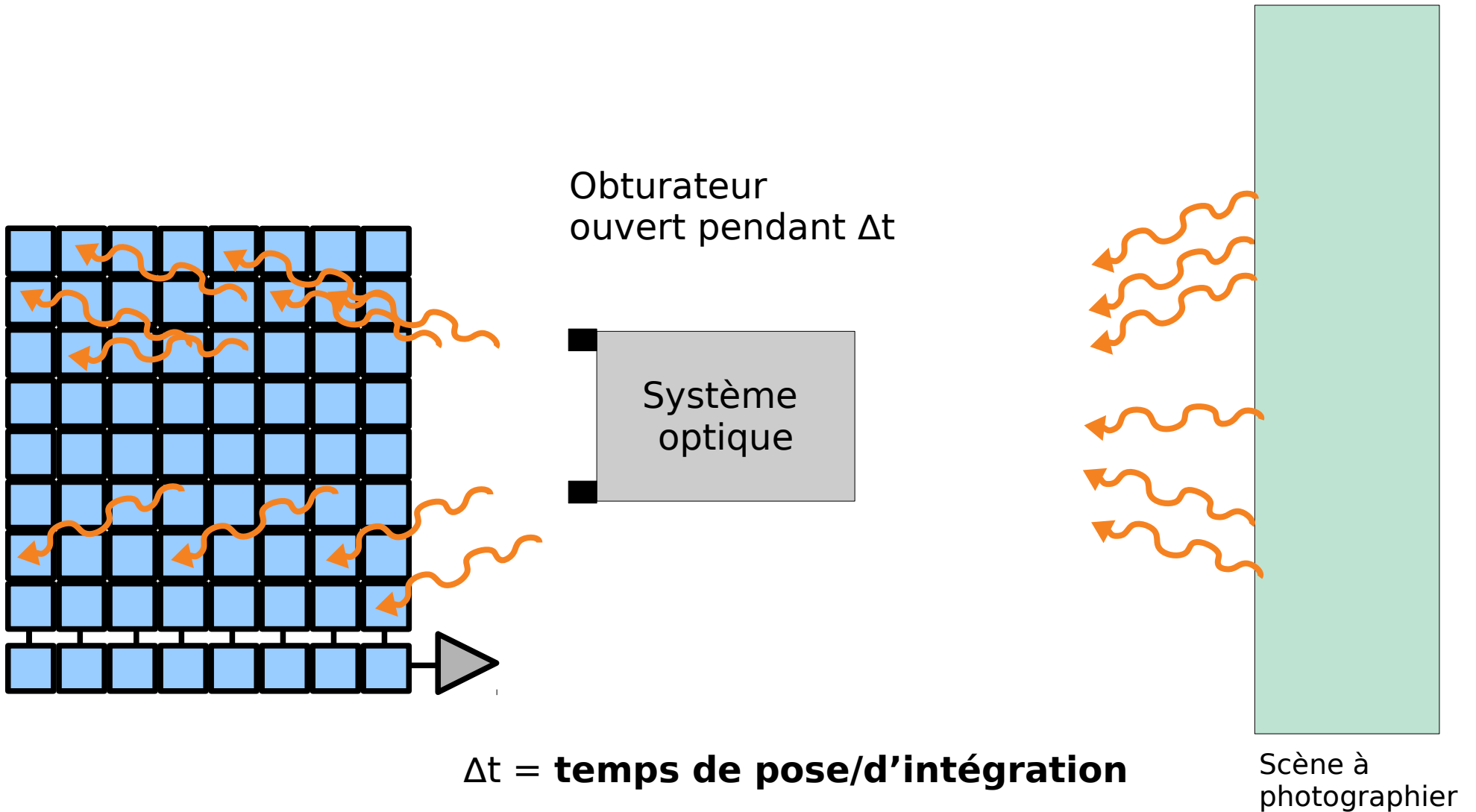
Stockage des charges

- Plus la température augmente, plus la capacité du puits diminue.
- Le **registre a des tailles de puits plus importantes que pour les photo-sites de la matrice** par un facteur 2-4.

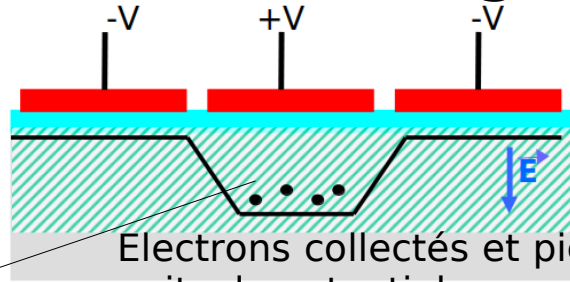
Prise d'image



Prise d'image

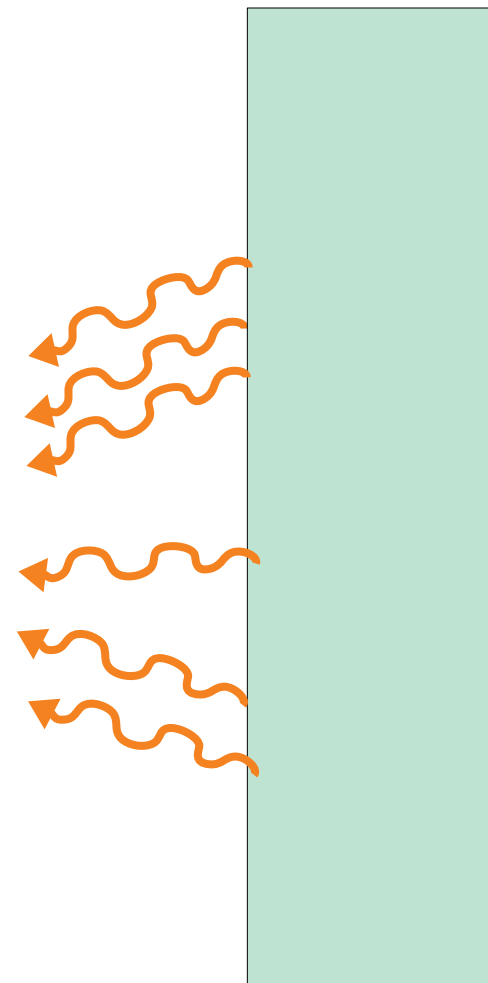
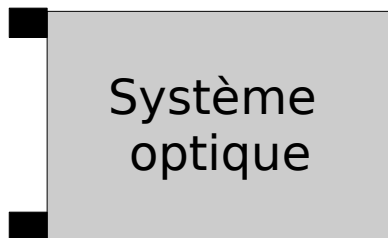
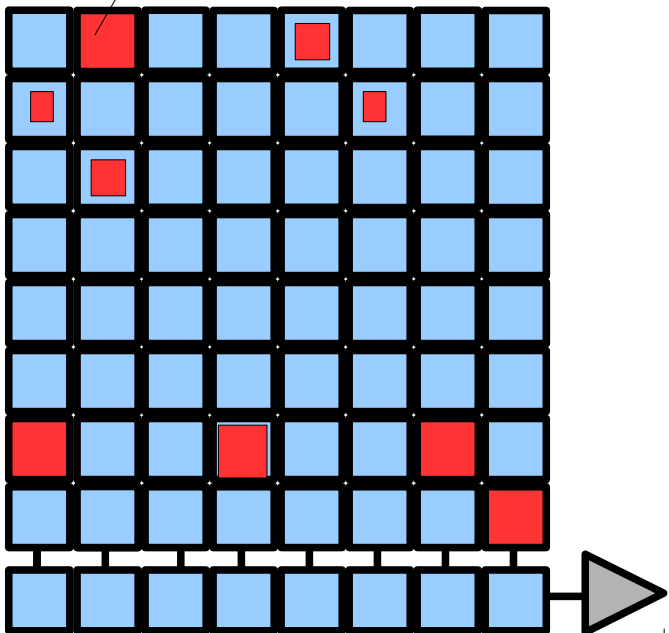


Prise d'image



Électrons collectés et piégés dans puits de potentiel

Conversion photons \rightarrow électrons

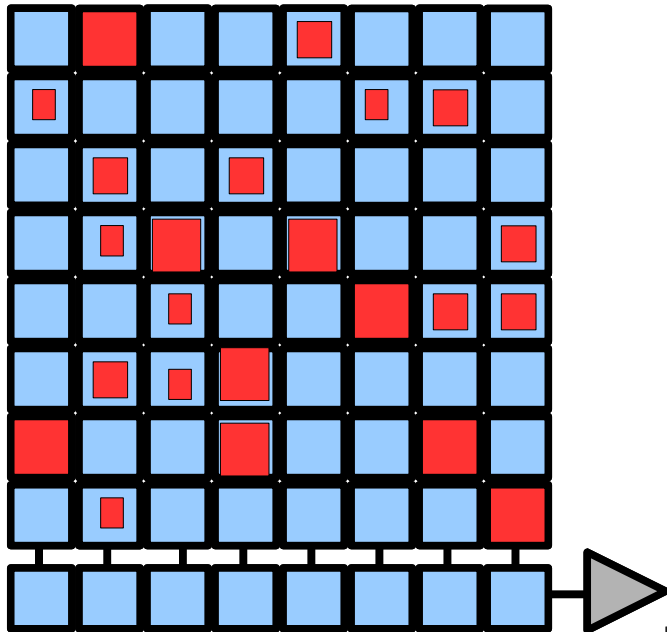


Scène à photographier

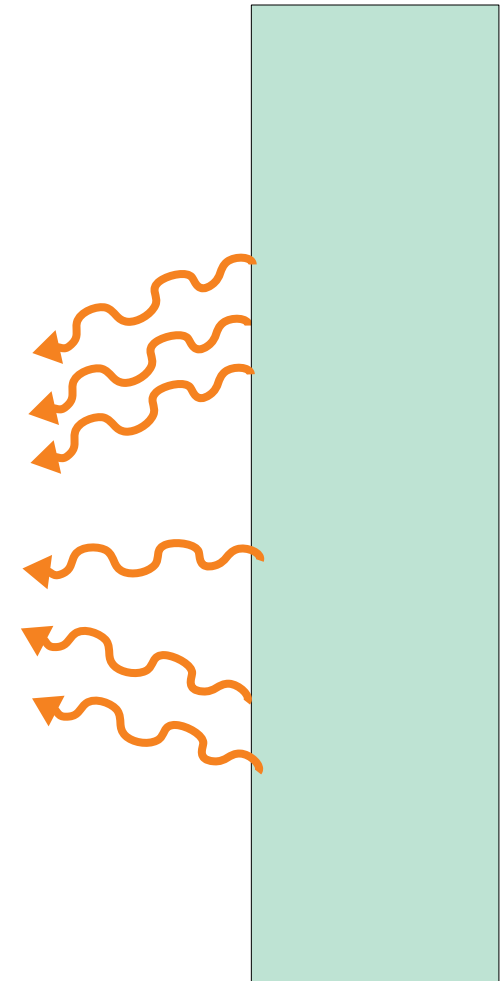
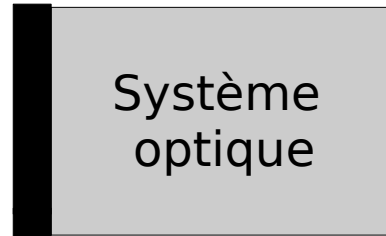
Prise d'image

Durée de la prise d'image (exposition du CCD à la lumière) = **Temps d'intégration ou temps de pose**

L'image est maintenant stockée sur le CCD sous forme de paquets d'électrons.



Obturateur
fermé

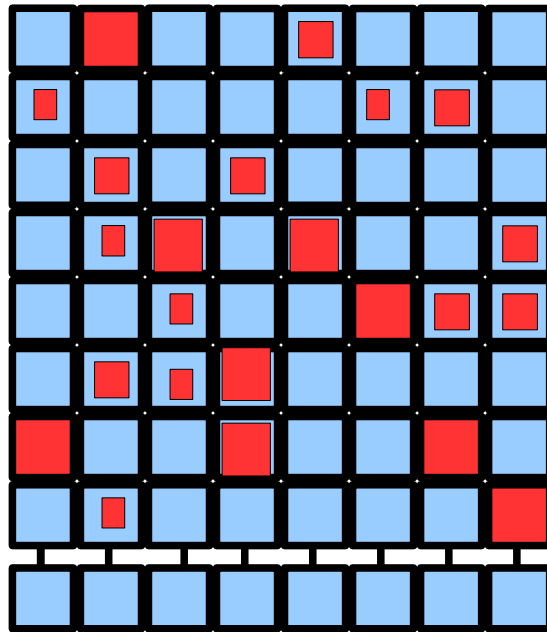


Scène à
photographier

- Une fois les e- collectés et stockés dans les puits de potentiel, que doit-on faire ?

- Une fois les charges collectées et stockées dans les puits de potentiel, que doit-on faire ?

=> Mesurer la quantité de charges présentes dans chaque photo-site



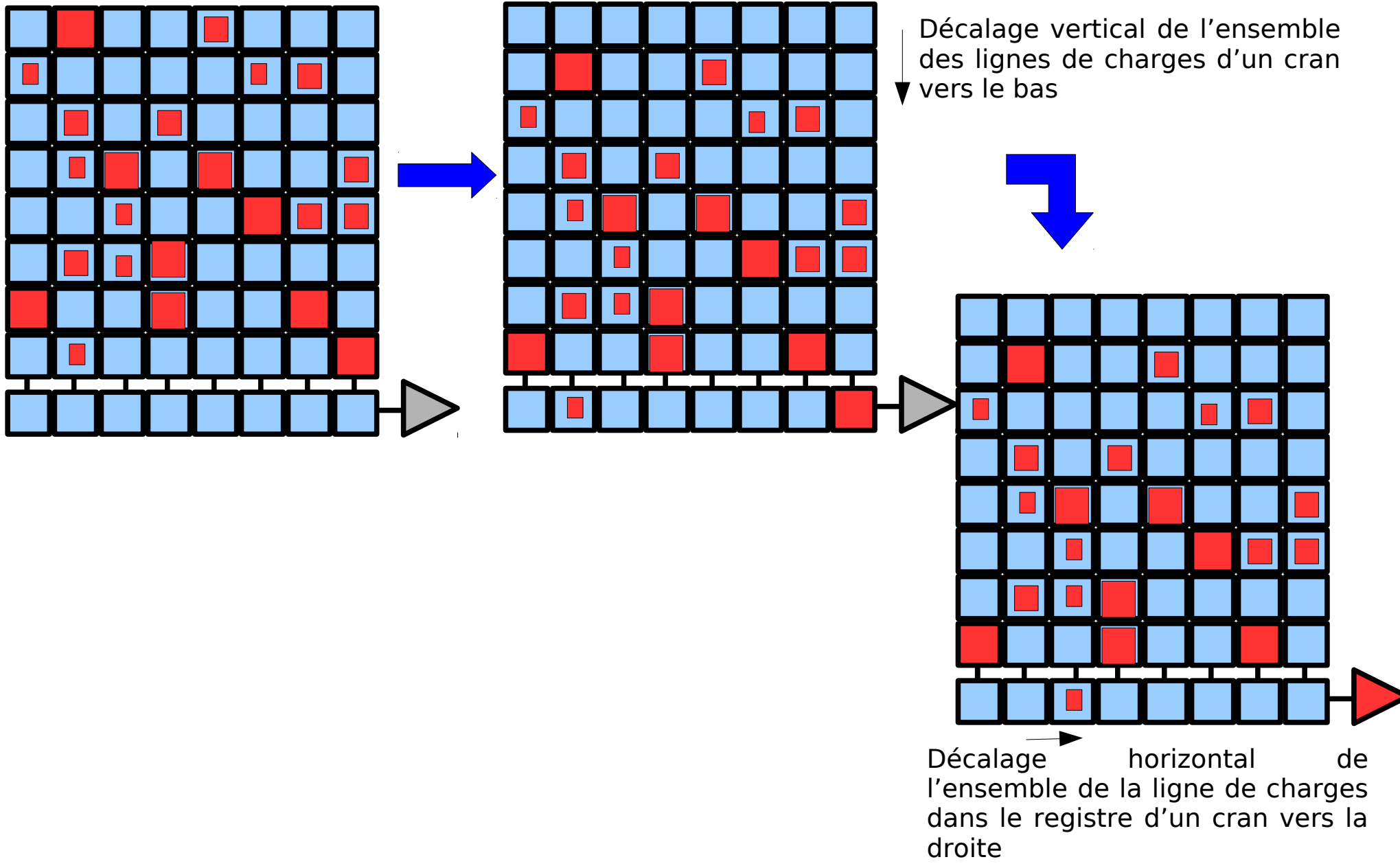
Etage de pré-amplification = mesure des charges Q

Registre = ligne de photo-sites

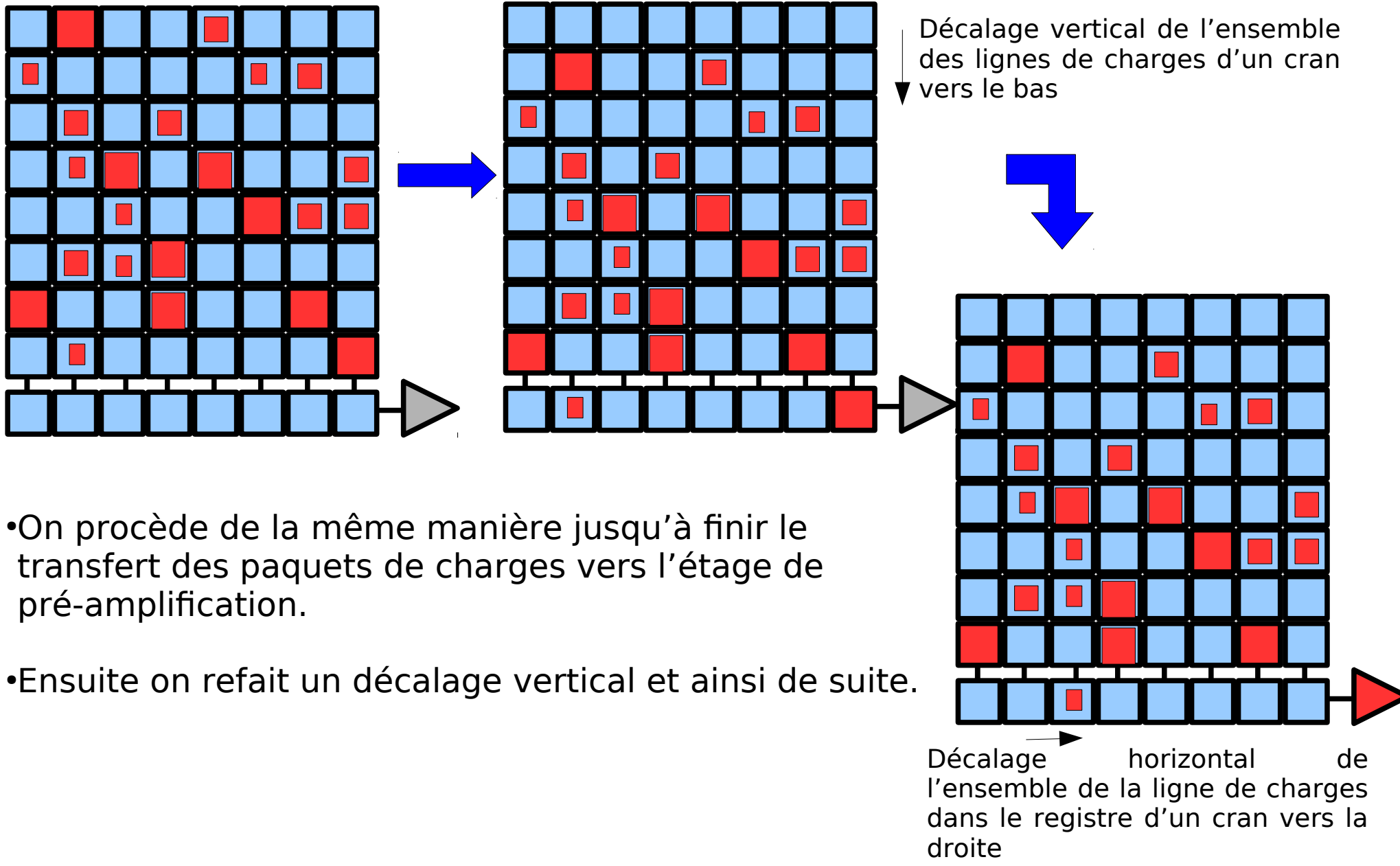
Le **registre** peut être vertical et il peut y en avoir plusieurs.

- En utilisant le registre, comment peut-on amener les paquets de charges vers l'étage de pré-amplification sans les mélanger ?

- En utilisant le registre, comment peut-on amener les paquets de charges vers l'étage de pré-amplification sans les mélanger ?

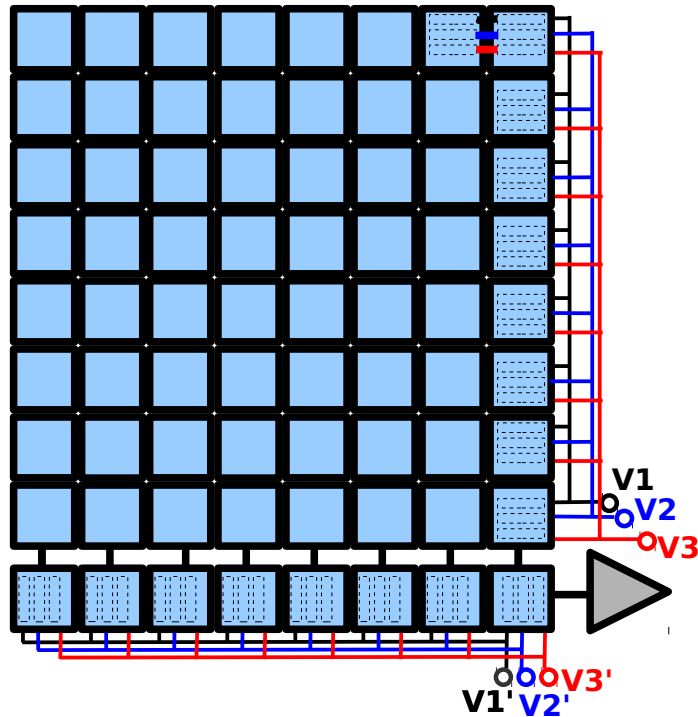


• En utilisant le registre, comment peut-on amener les paquets de charges vers l'étage de pré-amplification ?



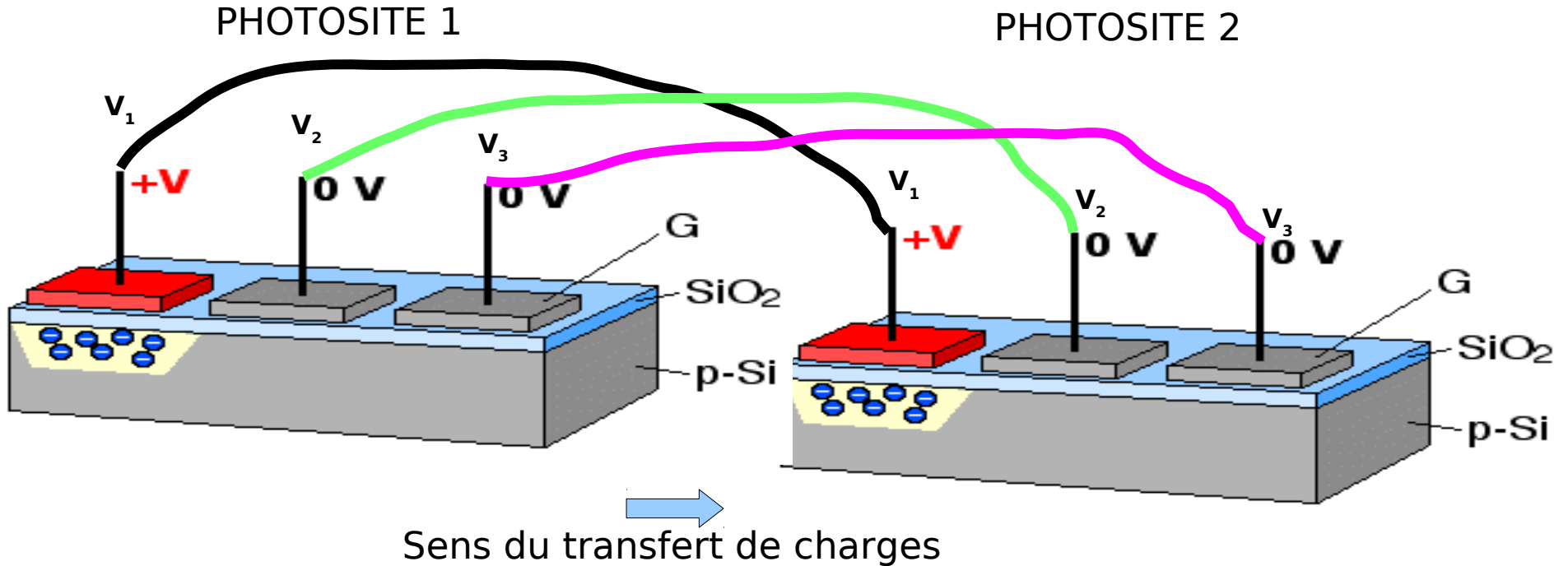
- On procède de la même manière jusqu'à finir le transfert des paquets de charges vers l'étage de pré-amplification.
- Ensuite on refait un décalage vertical et ainsi de suite.

Transfert de charge



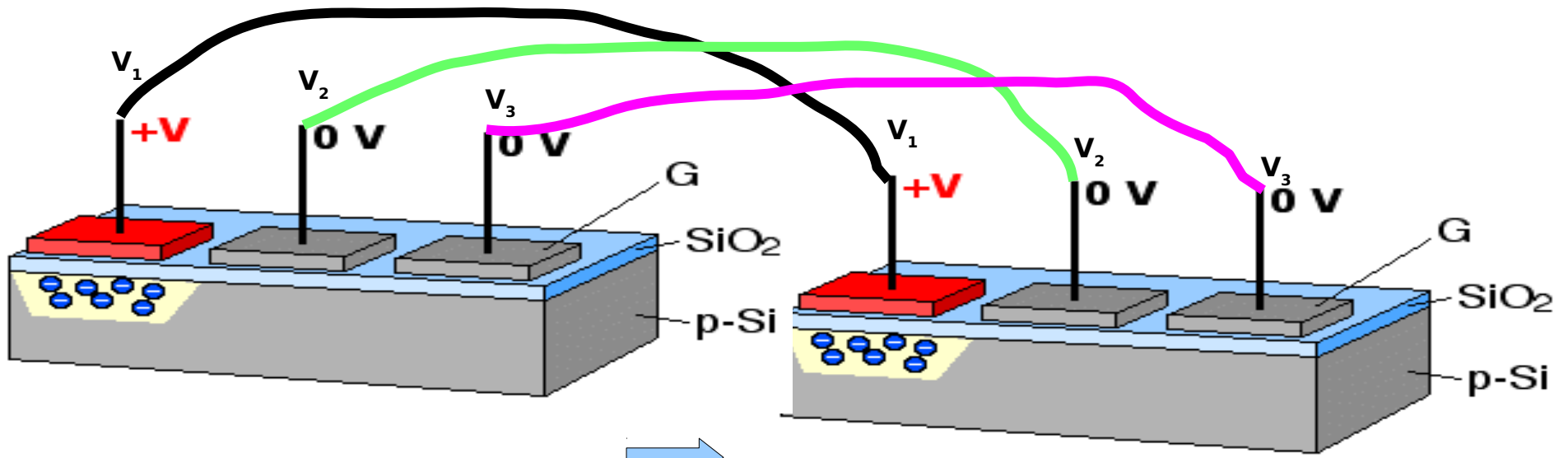
- **Déformation des puits de potentiel** pour permettre aux **électrons de passer de photo-site en photo-site** en jouant sur les tensions appliquées aux électrodes
- Pour obtenir un **effet synchronisé**, les **électrodes sont couplées** sur la matrice active d'une part et d'autre part sur le registre.
- C'est le second **C(oupled)** dans **CCD**.

- Les **électrodes de chaque photo-site sont couplées.**
- Pour un CCD à 3 phases, la première électrode de chaque pixel est portée à un potentiel V_1 , la seconde à V_2 et la troisième à V_3 .
- Pour **décaler les charges** stockées dans le photo-site ligne par ligne, il suffit d'**alterner la valeur des potentiels** V_1 , V_2 et V_3 .

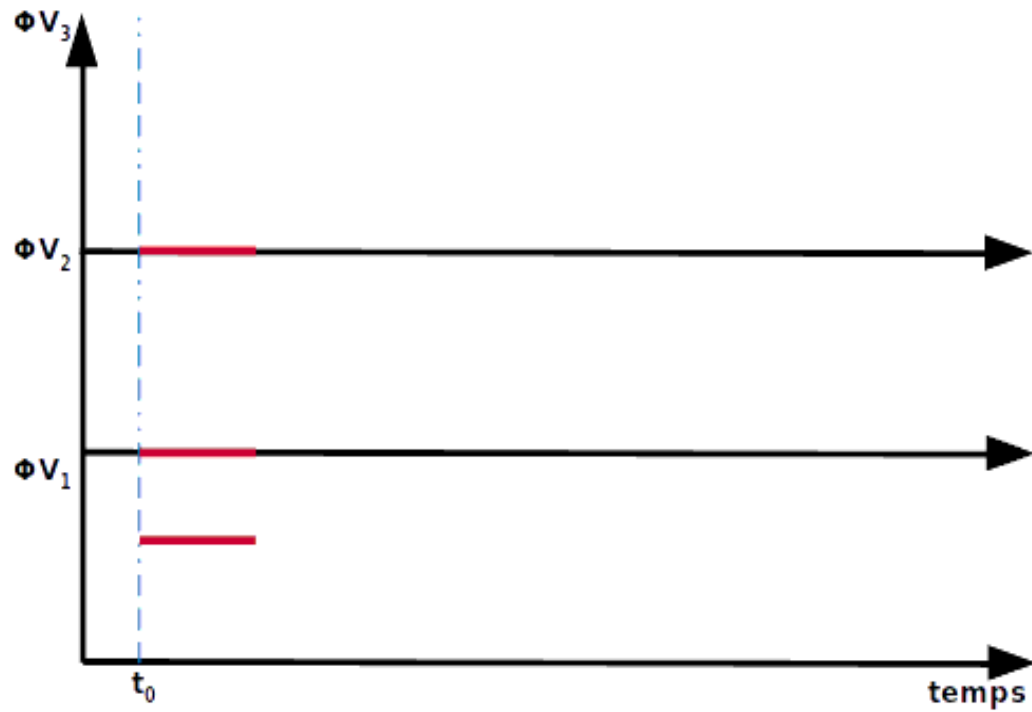


PHOTOSITE 1

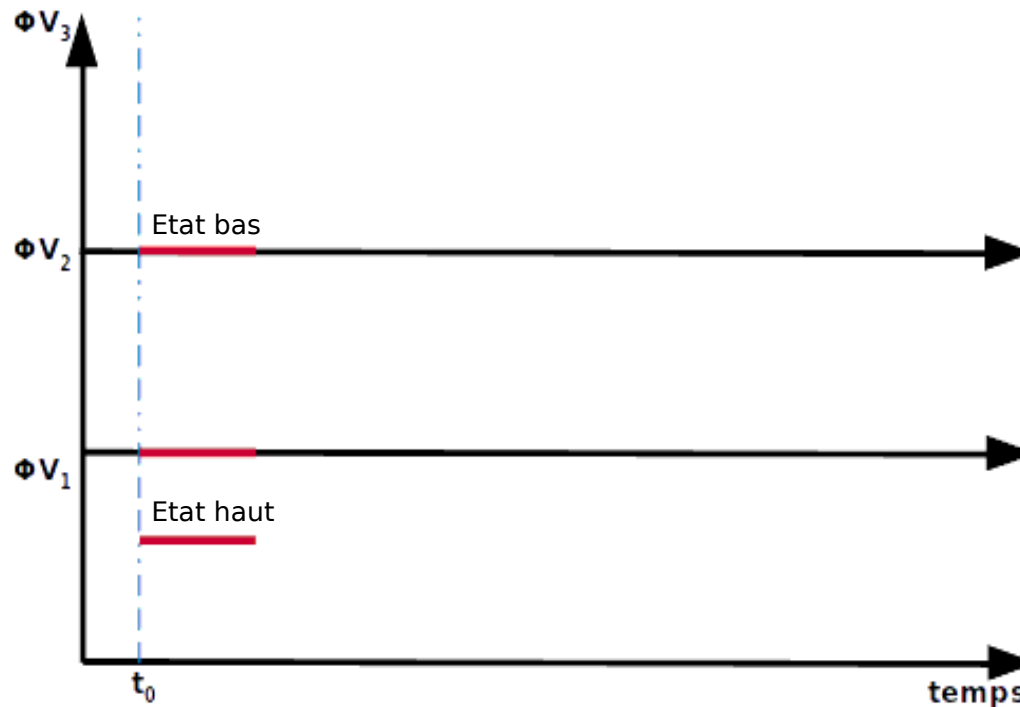
PHOTOSITE 2



Sens du transfert de charges



- Le **bascullement des tensions** de chaque électrode est contrôlé par une **horloge** avec 2 états. Chaque **état** correspond à une **valeur de tension**.
- L'ensemble des cadencements des horloges constitue un **chronogramme**.
- Plus la phase est grande, plus la synchronisation des différentes horloges doit être précise.



La mesure des charges - chaîne de lecture

- L'objectif de la **chaîne de lecture** est :
 - de **recupérer les charges Q** de chaque photo-site
 - de **convertir les charges stockées (Q) en signal analogique (tension ΔV)**
 - de **numériser la valeur ΔV** grâce à un **convertisseur analogique/numérique (CAN)**.
- Les différents étages de la chaîne doivent être **linéaires**.

* L'étage de pré-amplification

- Cet étage est directement monté à la sortie du registre.
- Il sert à la **conversion charge (Q) - tension (ΔV)**.
- Une fois que la mesure a été faite (i.e. **numérisation**), la charge présente dans la diode flottante doit être supprimée. C'est le rôle de **l'horloge de reset Φ_R** .
- **Processus de lecture du CCD destructif i.e. perte de la charge stockée Q.**

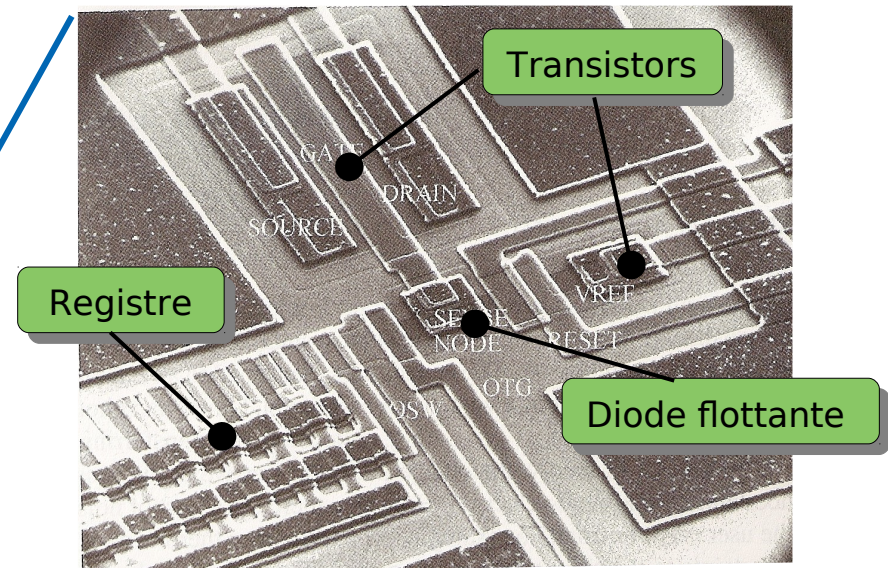
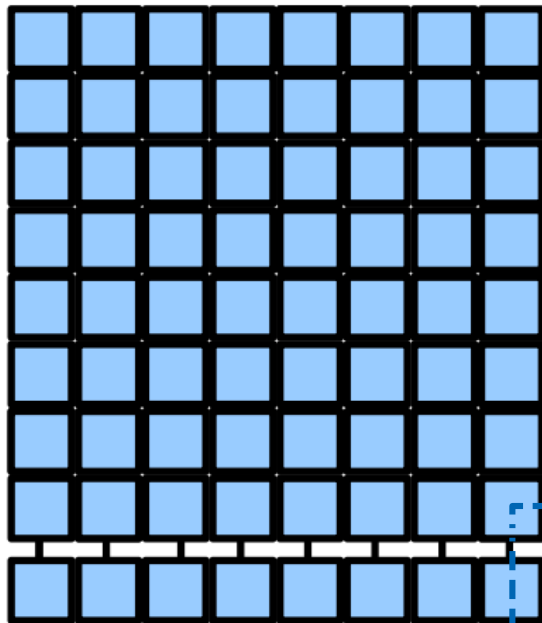


Image obtenue avec un microscope à balayage de l'étage de pré-amplification

* **L'étage de pré-amplification**

- Cet étage est directement monté à la sortie du registre.
- Il sert à la **conversion charge (Q) - tension (ΔV)**.
- Une fois que la mesure a été faite (i.e. **numérisation**), la charge présente dans la diode flottante doit être supprimée. C'est le rôle de **l'horloge de reset Φ_R** .
- **Processus de lecture du CCD destructif i.e. perte de la charge stockée Q.**

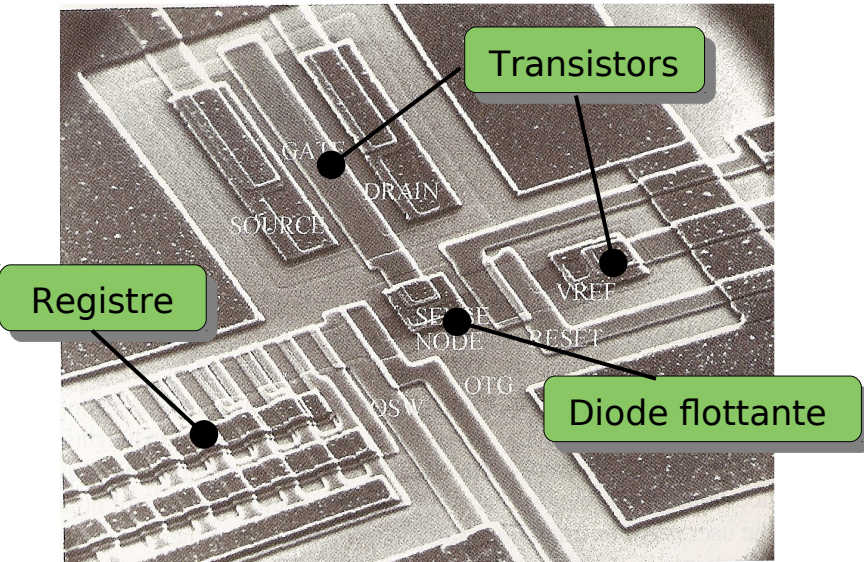


Image obtenue avec un microscope à balayage de l'étage de pré-amplification

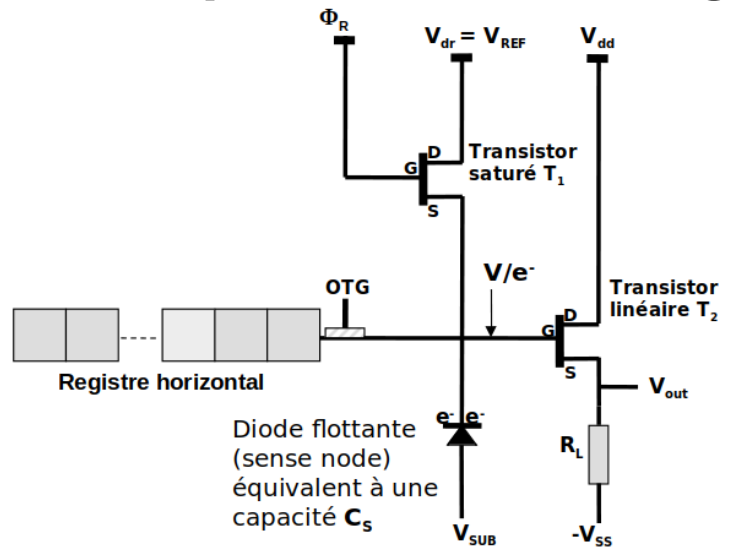


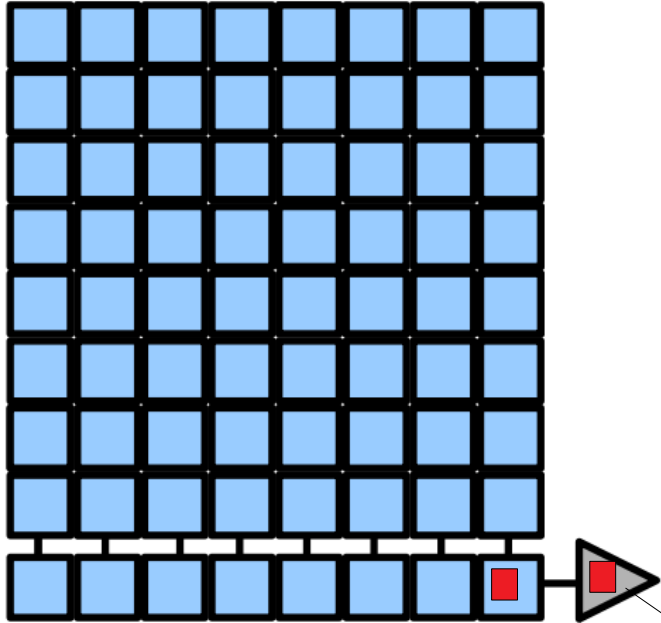
Schéma électrique du pré-amplificateur

Sensibilité de la diode flottante

$$S_v (V/e^-) = e / C_s$$

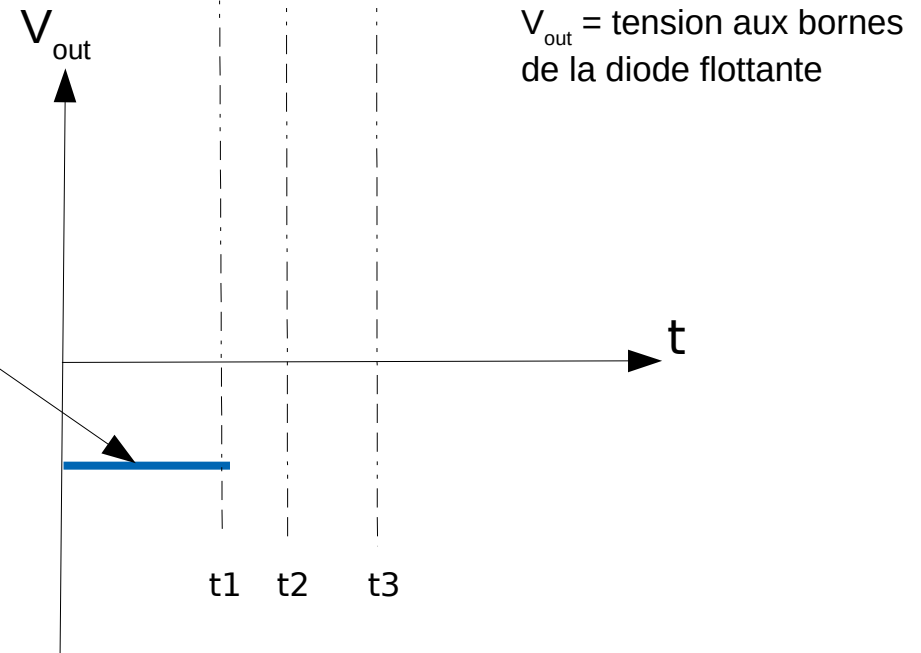
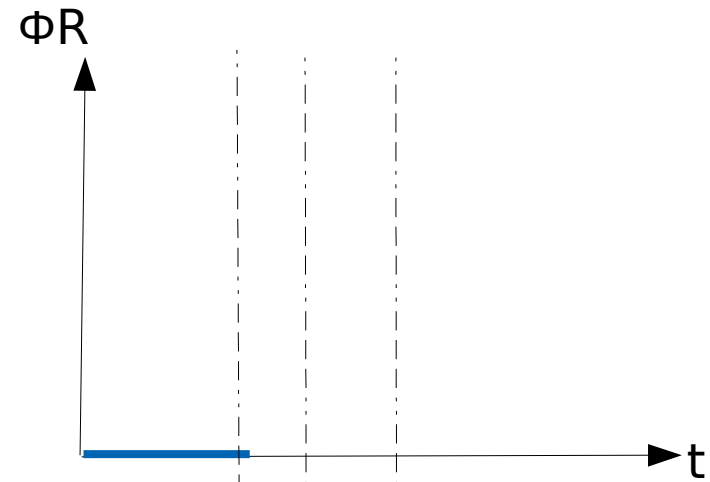
avec $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C et $C_s =$ capacité de stockage de la diode en Farad (F)

* L'étage de pré-amplification

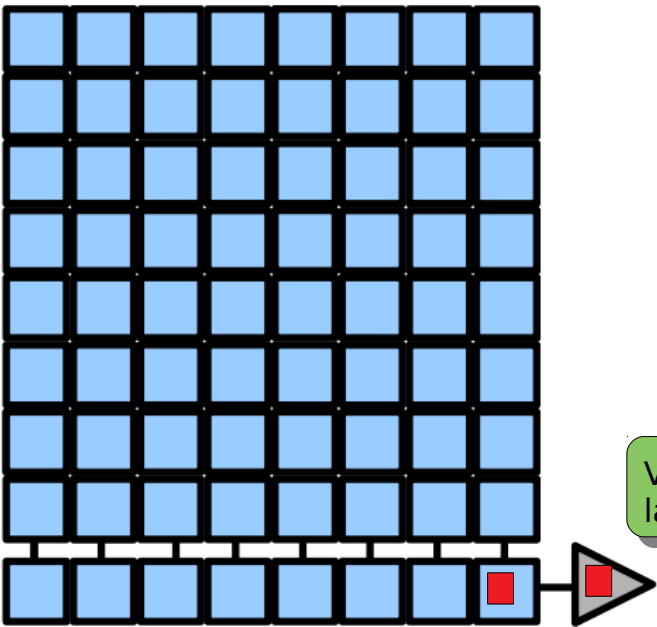


$t < t_1$, paquet d'électrons Q_0 présent dans la diode flottante

$t = t_1$, intensité numérique codée par le convertisseur analogique/numérique
 $\Rightarrow Q_0$ ne sert plus à rien



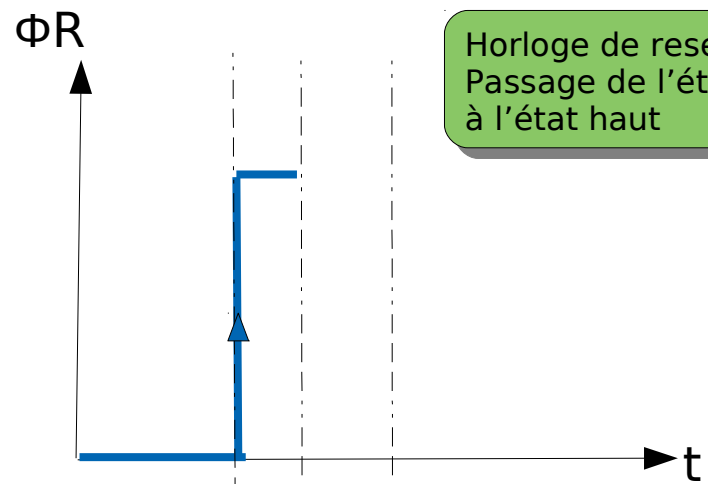
* L'étage de pré-amplification



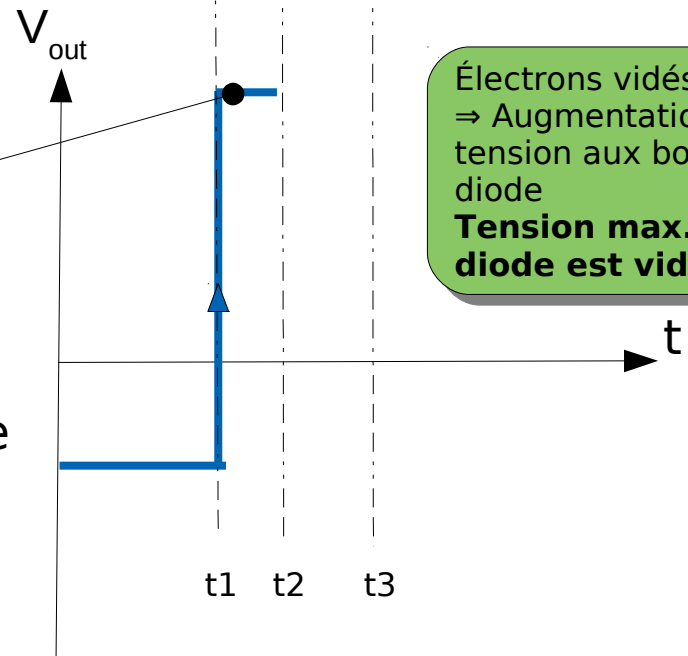
Vidage de la diode

Palier de drain de reset

t1 = Début du **vidage** de la diode flottante commandé par l'horloge de reset ΦR

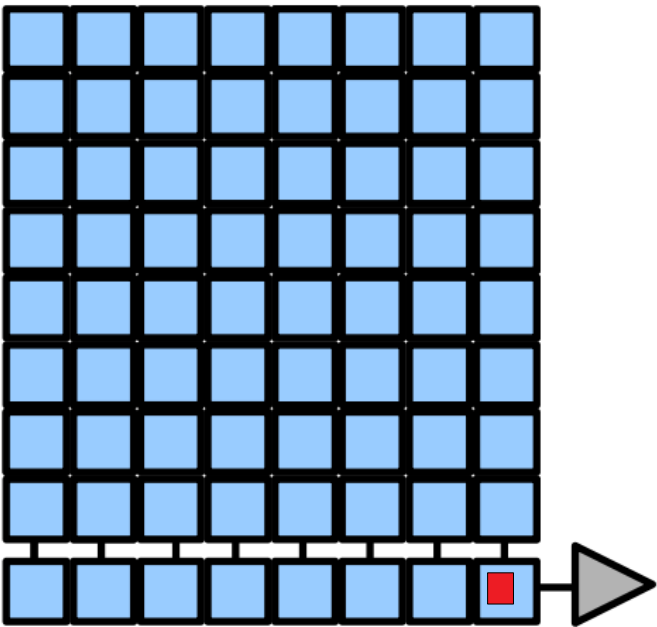


Horloge de reset
Passage de l'état bas à l'état haut



Électrons vidés de la diode
⇒ Augmentation de la tension aux bornes de la diode
Tension max. lorsque la diode est vide.

* L'étage de pré-amplification

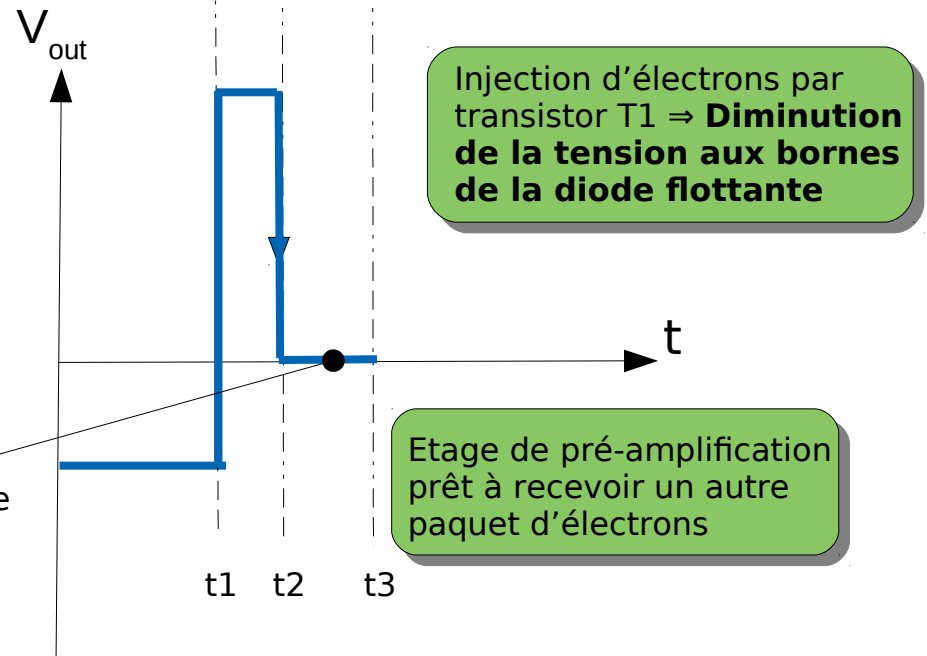
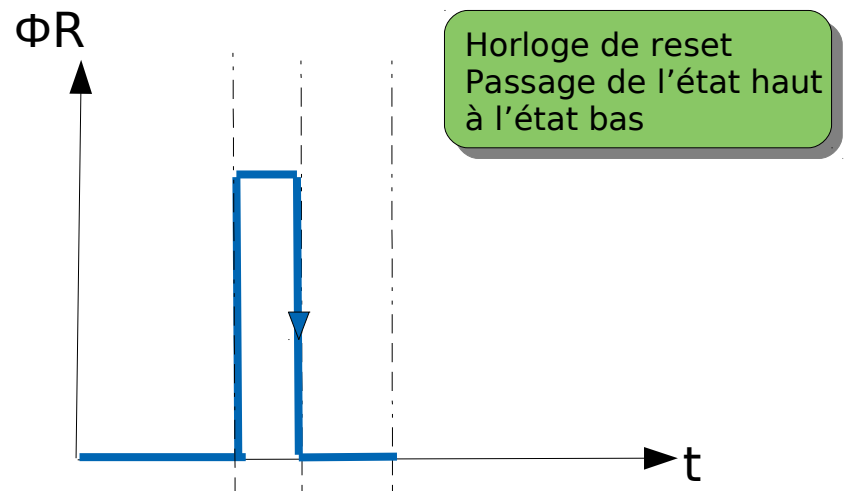


t2 = fin du vidage

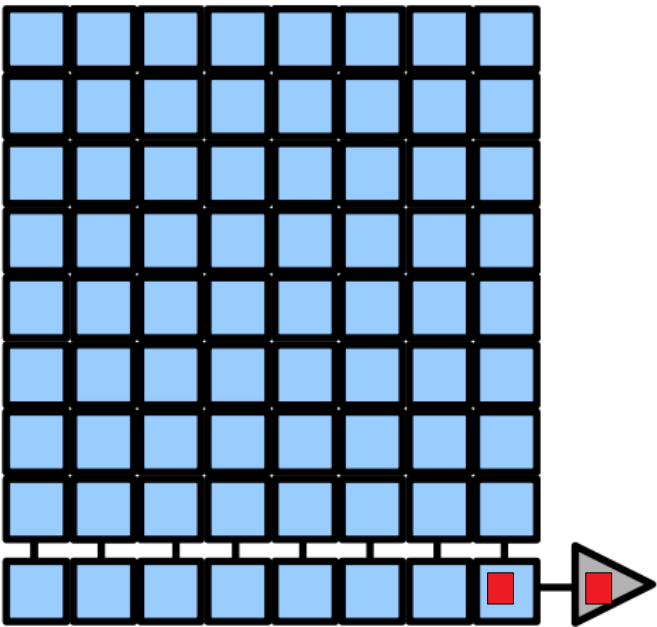
Création d'un **palier de référence** = « 0 » de la chaine de mesure (étage de clamp)

t3 = diode flottante prête à recevoir un paquet d'électrons

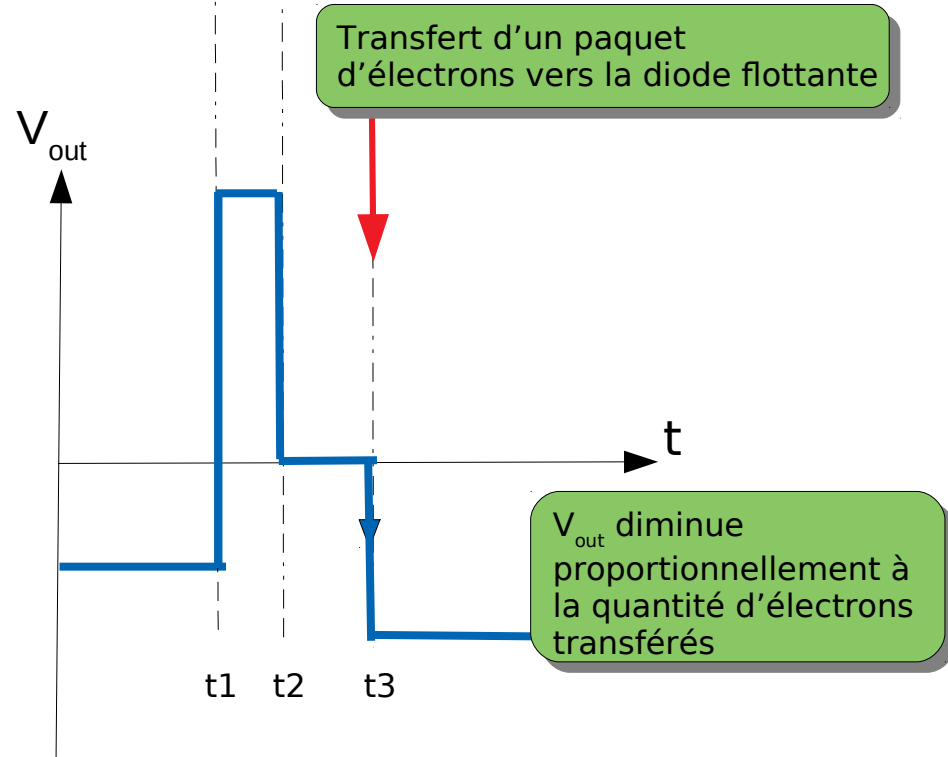
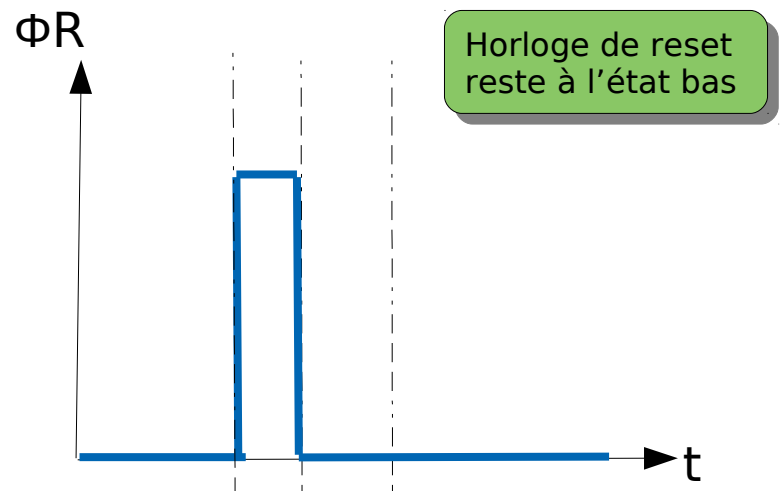
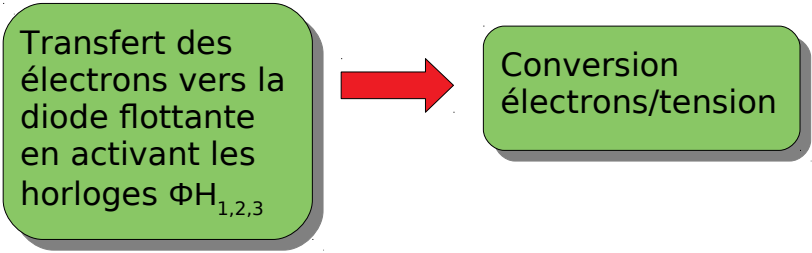
Palier de référence



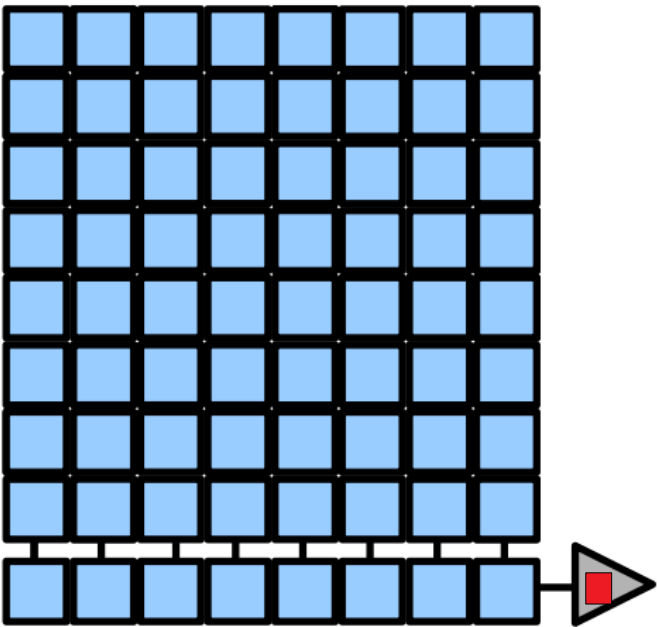
* L'étage de pré-amplification



t3 = transfert d'un paquet d'électrons du registre vers la diode flottante



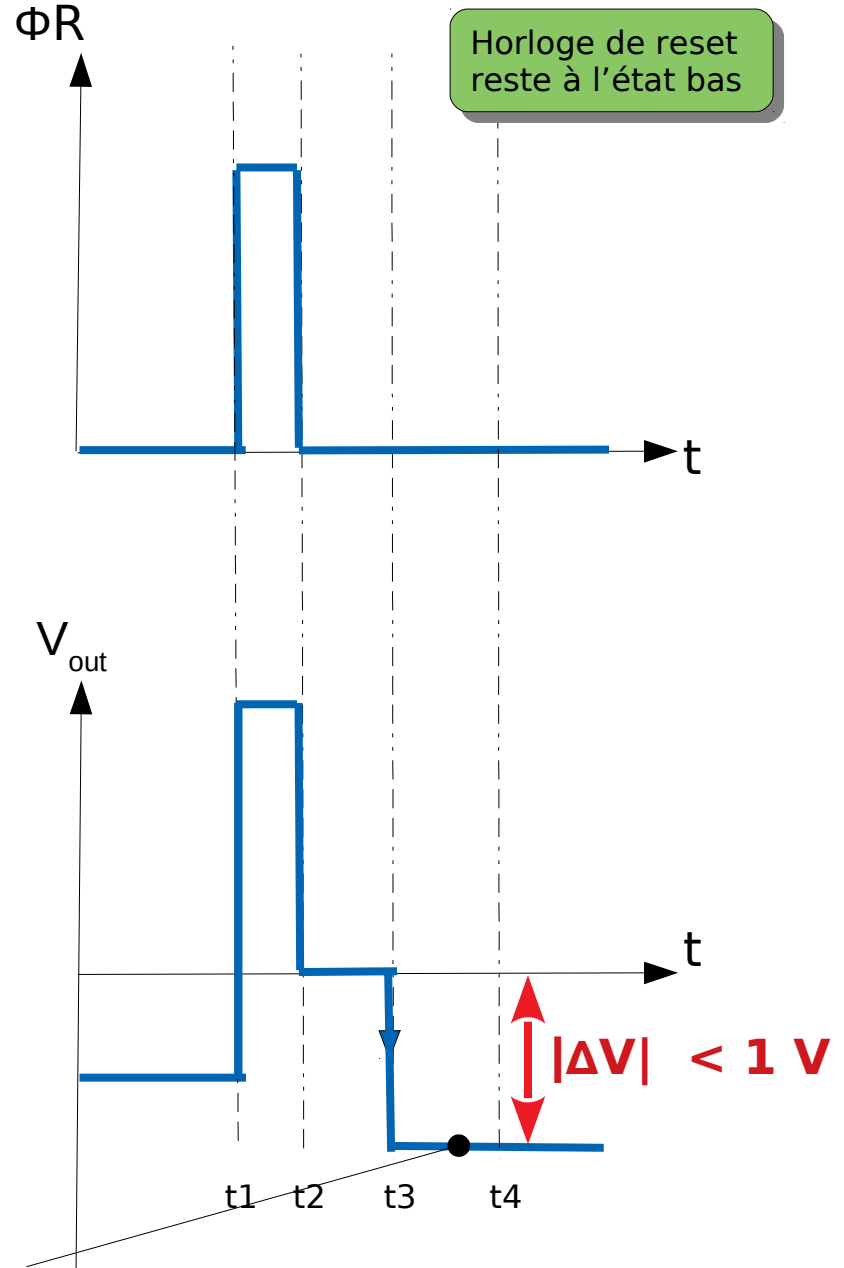
* L'étage de pré-amplification



$|\Delta V|$ proportionnel à la quantité d'électrons transférés du registre à la diode flottante

t_4 = activation du convertisseur analogique/numérique pour coder $|\Delta V|$ en passant Φ_{CAN} à l'état haut (**numérisation**)

A la fin de la numérisation à t_5 , retour à l'étage t_1 (i.e. vidage de la diode)



- La **numérisation du signal par le CAN** ne doit se faire que lorsque le **palier vidéo est atteint**.

=> Une **horloge** (Φ_{can}) indique au **CAN quand il doit coder**.

- Le but du CAN est de **convertir un signal analogique continu en un signal discret sur une dynamique linéaire** et ce de manière régulière dépendant de la fréquence d'échantillonnage tel que :

$$V \rightarrow I = \sum_{i=0}^{n-1} b_i 2^i$$

- Plus le nombre de bits utilisé (n) pour le codage du signal vidéo est grand et plus la précision de codage est grande

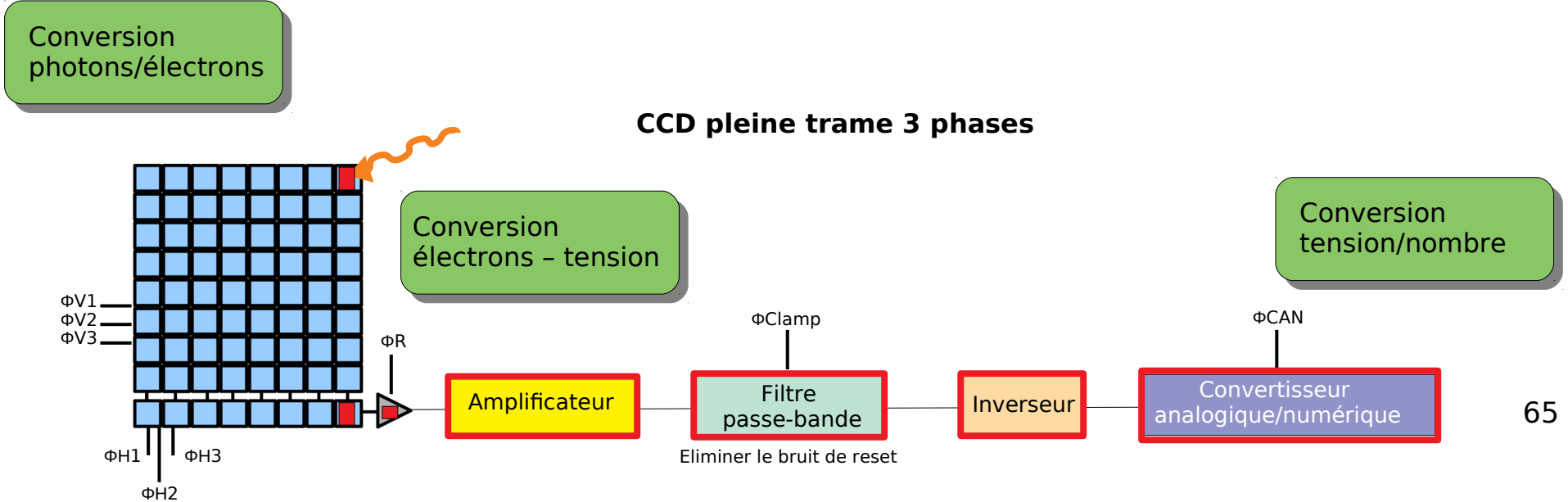
=> **limiter le bruit de discrétisation lié au codage numérique**

- Ex. : Soit un CCD avec une capacité de 10^5 e⁻/photo-site,
 - pour un CAN codant sur 15 bits (soit 32768 niveaux), la sensibilité du CAN (S_{CAN}) est de l'ordre de 3 e⁻ par niveau.
 - pour un CAN codant sur 10 bits (soit 1023 niveaux), $S_{\text{CAN}} \sim 98$ e⁻ par niveau.

- Il est important de choisir un CAN qui a une dynamique de codage compatible avec la dynamique du CCD.

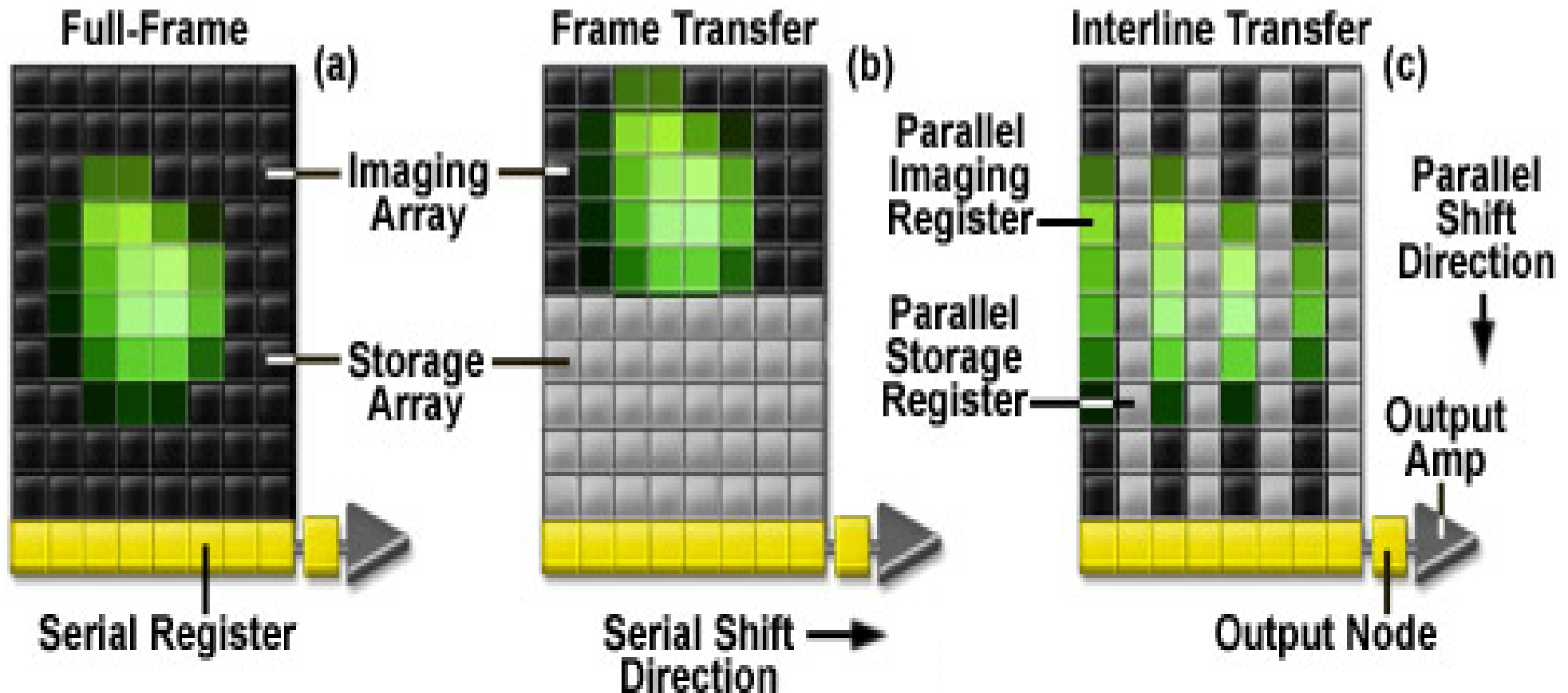
Pour résumer :

- 1 seule chaîne électronique de lecture dans les CCDs dont chaque étage a un comportement linéaire
- Une fois l'image formée sur la matrice du CCD sous forme de paquets d'électrons (Q_i) => déplacements physiques et synchronisés des Q_i via le registre vers la diode flottante (phase de lecture)
- Les signaux Q_i sont convertis en tension (signaux analogiques ΔV_i) qui sera filtrée et amplifiée, puis convertit en un nombre I par le CAN (phase de numérisation).
- Si tous les étages du capteur CCD ont un comportement linéaire alors l'intensité lumineuse sur un photo-site est proportionnelle au nombre I.



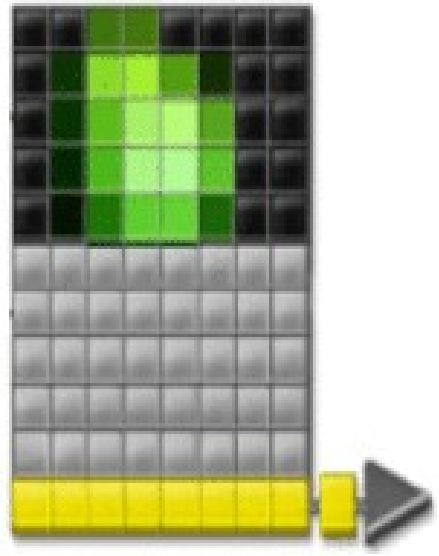
Autres types de capteur CCD

Common Charge-Coupled Device (CCD) Architectures



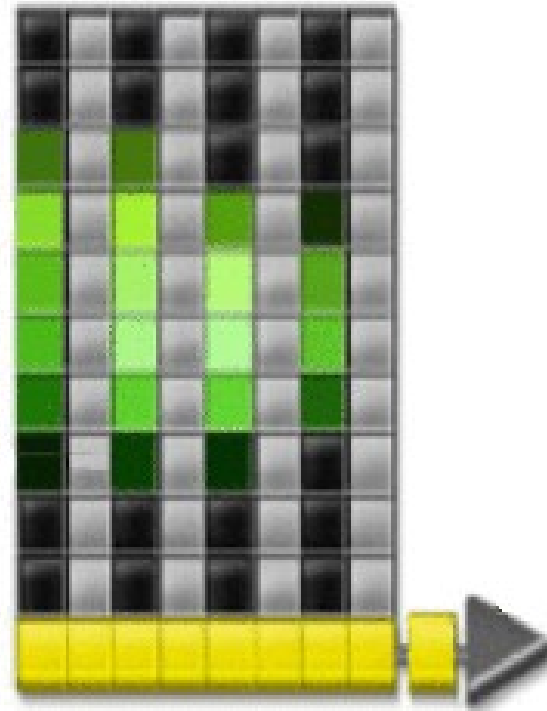
Autres types de capteur CCD

Frame Transfer



Autres types de capteur CCD

Interline Transfer

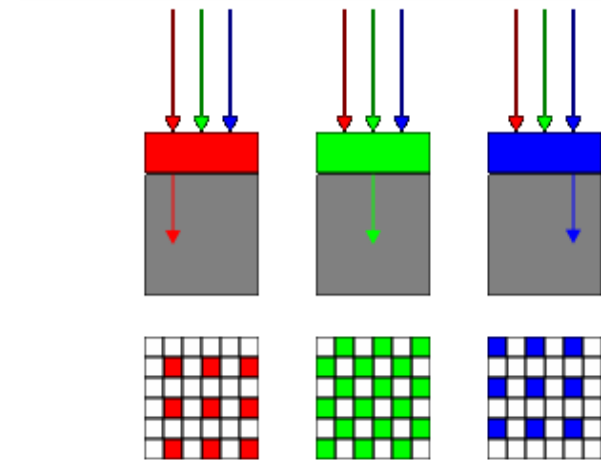
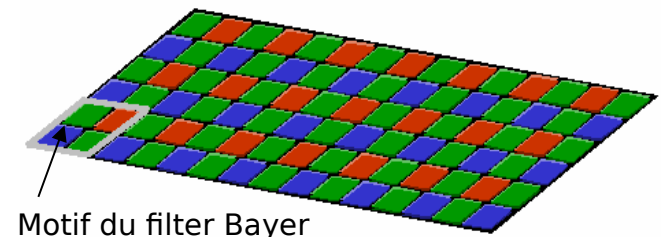


3 - Les capteurs couleurs

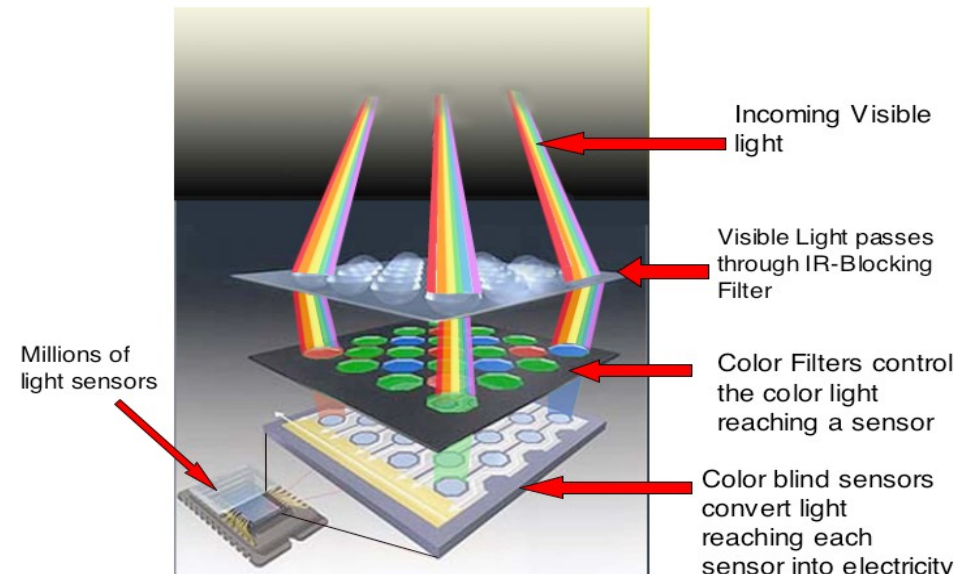
- Obtention de couleurs en utilisant les trois couleurs Rouge, Vert & Bleu
- 3 techniques utilisées :
 - a) Filtre mosaïque Bayer
 - b) Méthode séquentielle
 - c) Séparation dichroïque

a. Filtre de Bayer

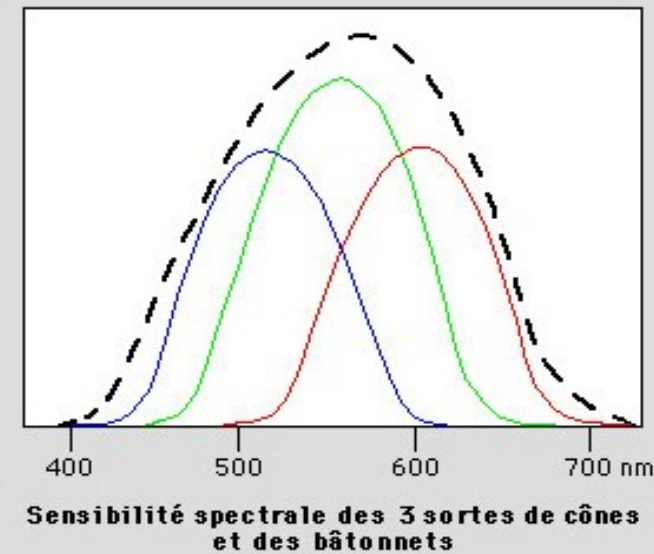
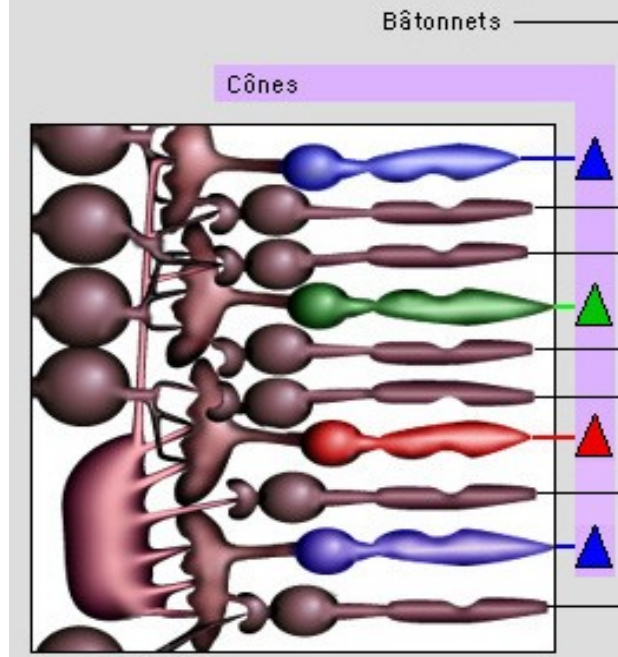
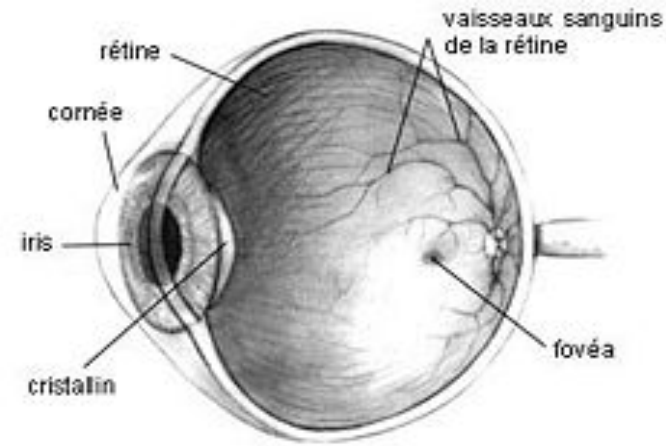
- Une mosaïque de 4 filtres : 2 verts, 1 rouge et 1 bleu répartie sur 4 pixels.
- Ajout de micro-lentilles sur chaque photo-site pour augmenter la fraction de lumière reçue par les photo-sites.
- Nécessité de disposer d'un algorithme de démosaïquage ("demosaicing algorithm or color filter array interpolation") pour former l'image en couleur.



RGB Inside the Camera

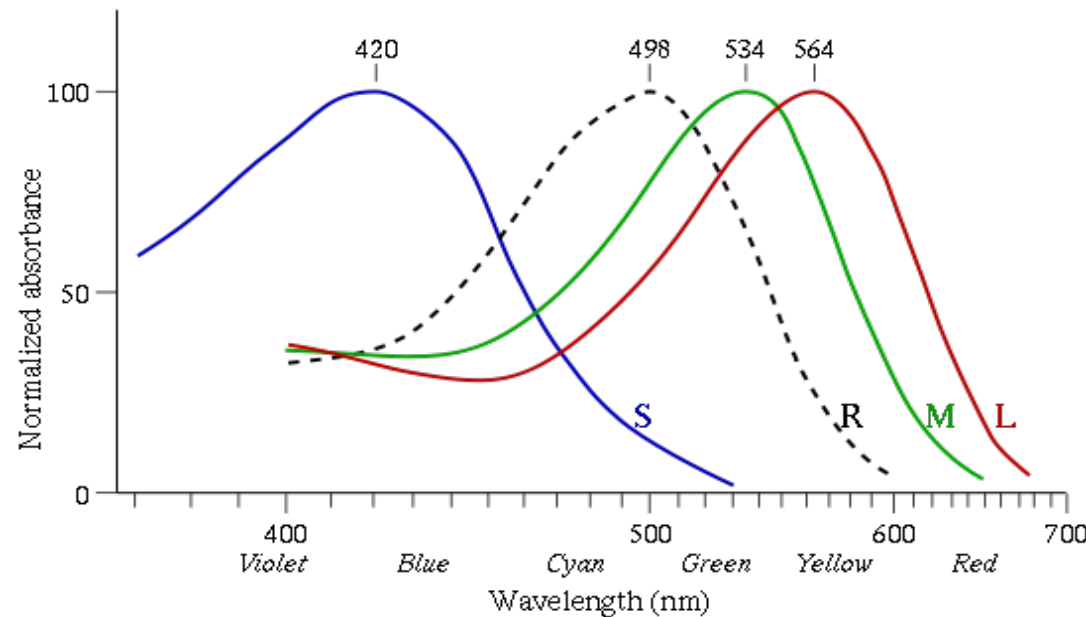


* L'œil humain



• L'œil est composé de cônes qui nous permettent de percevoir les couleurs et bâtonnets.

• L'œil possède plus de cônes sensibles au vert que de cônes sensibles au rouge et bleu.



Exemple de reconstruction utilisant un algorithme d'interpolation bi-cubique



Image photographiée



Filtre vert



Filtre rouge



Filtre bleu

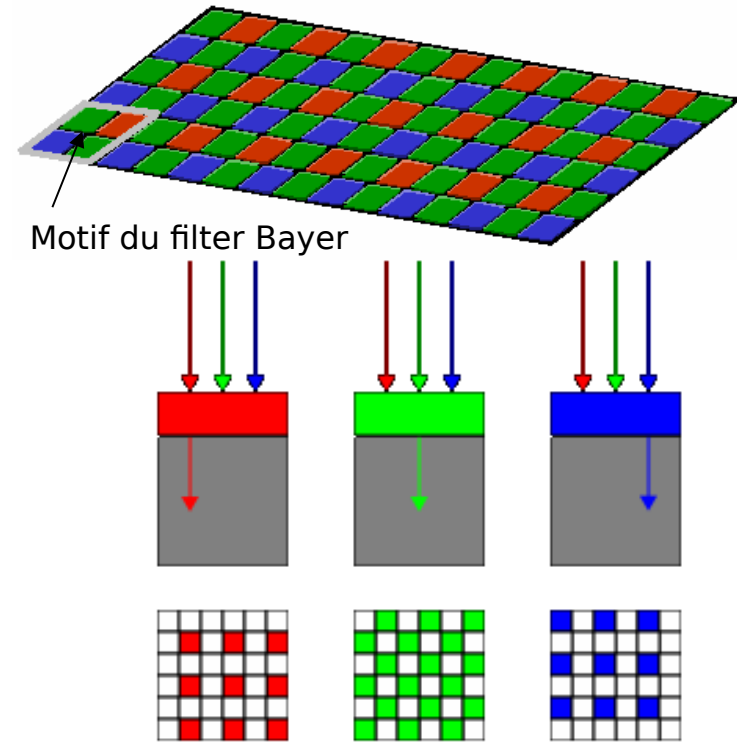


Image obtenue par le filtre de Bayer

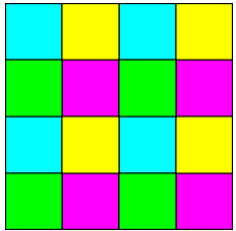


Image reconstruite

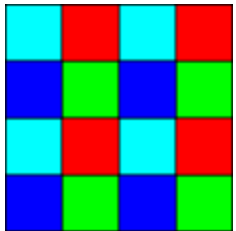
- Une mosaïque de 4 filtres : 2 verts, 1 rouge et 1 bleu répartie sur 4 pixels.
- Ajout de micro-lentilles sur chaque photo-site pour augmenter la fraction de lumière recue par les photo-sites.
- Nécessité de disposer d'un algorithme de démosaïquage ("demosaicing algorithm or color filter array interpolation") pour former l'image en couleur.
- Avantage : facile à implémenter
- Désavantages :
 - × Perte de résolution spatiale
 - × Perte de sensibilité car sélection dans une bande donnée



- Il existe d'autres filtres mosaïques (2 x 2)

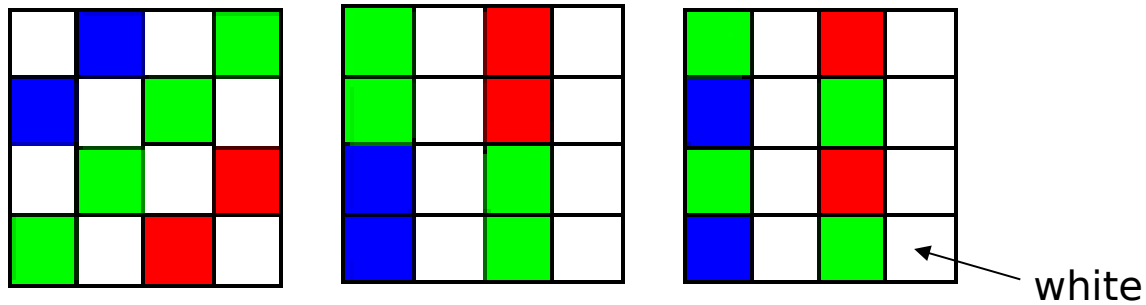


- Filtre Cyan, jaune, vert & magenta (CYGM)
 - Meilleure sensibilité à la luminance (flux lumineux)
 - rendu de couleurs plus approximatif



- Filtre Rouge, Vert, Bleu & "Emeraude - cyan" (RGBE)
 - rendu des couleurs plus proches de la vision humaine

- Il existe d'autres filtres mosaïques panchromatiques pour augmenter la sensibilité à toutes les longueurs d'onde.



Filtres RGBW de Kodak



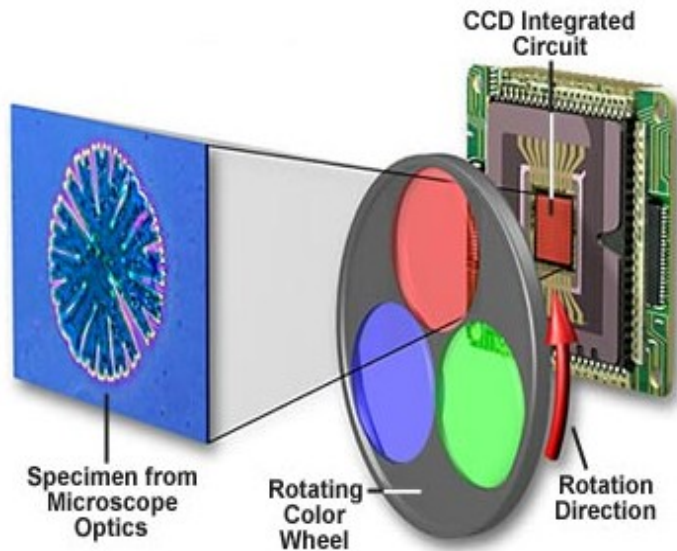
Bayer Color Filter Pattern



KODAK TRUESENSE Color Filter Pattern



b Méthode séquentielle

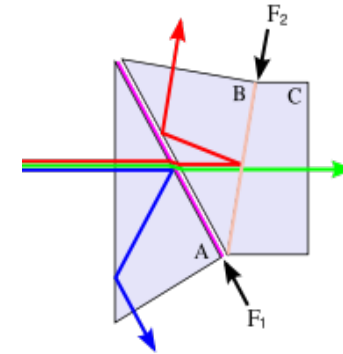


- On place une roue à filtre (RGB) devant une CCD.
- Prise d'images séquentielles dans chaque filtre.
- Reconstruction de l'image couleur via un logiciel.

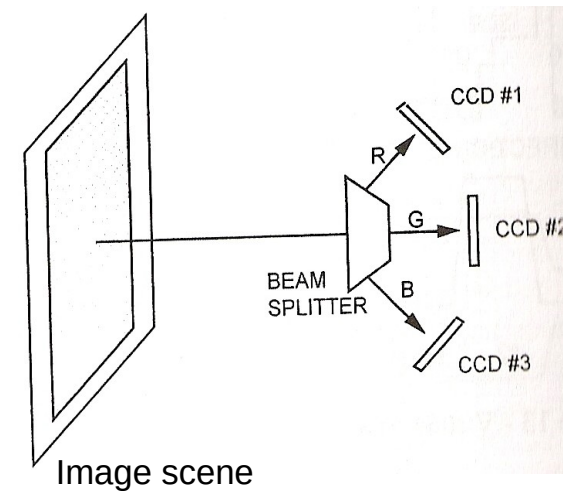
- Avantage : tous les pixels du CCD participent à la prise d'images pour un filtre donné – Amélioration de la résolution.
- Désavantages :
 - Perte en sensibilité car sélection dans 3 bandes seulement
 - Problème pour les prises d'images rapides du fait qu'il faille faire tourner la roue & temps d'exposition.

c séparation dichroïque

- Séparation de la lumière par un prisme dichroïque.
- 3 CCDs pour observer la lumière provenant du prisme (Rouge, Bleu & Vert).
- Logiciel pour recomposer l'image couleur.
- Avantages :
 - Meilleure résolution & sensibilité
 - Capacité à la prise d'images rapide
- Désavantages :
 - coût plus important car utilisation de 3 CCDs
 - complexité de mise en oeuvre



Principe du prisme dichroïque



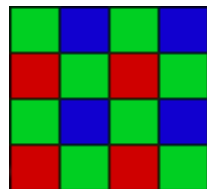
4 - Aberrations

- Il existe plusieurs aberrations et effets qui dégradent la qualité de l'image numérique.

Aberrations chromatiques

* Aliasing chromatique

- L'aliasage chromatique est dû aux filtres de couleur présent sur le CCD.
- Une ligne blanche sur un fond noir sera interprétée comme une ligne composée de pixels associés aux couleurs primaires du filtre utilisé (ici le filtre Bayer).
- A l'écran, la ligne blanche apparaîtra alors en couleur !
- Illustration sur la photo où l'on peut voir que la restitution des couleurs des cheveux n'est pas parfaite.



CCD
Filters

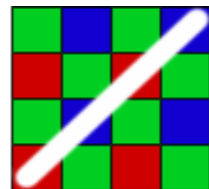
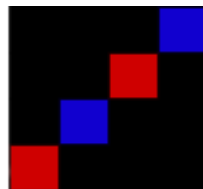
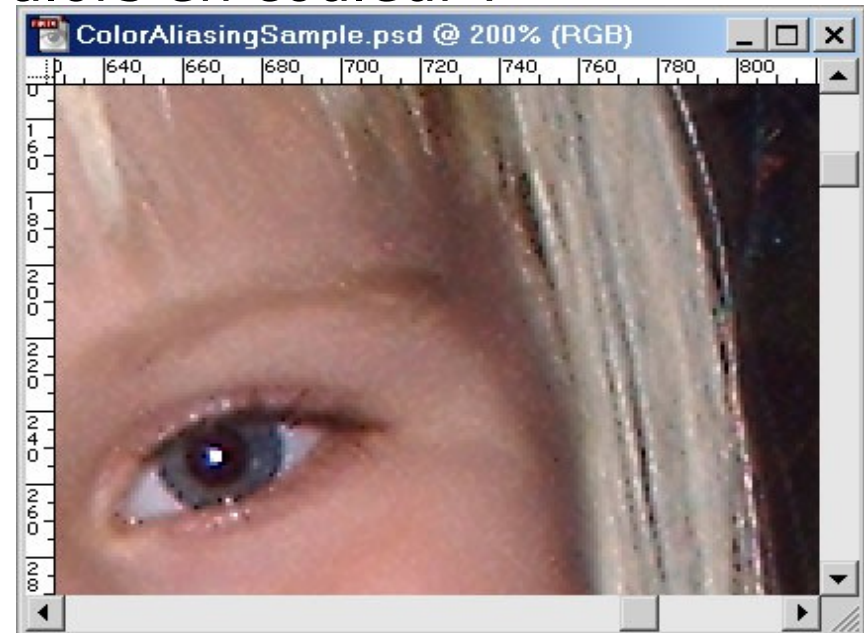


Image
On CCD



Result





Exemple d'aberration chromatique de type "purple fringing"

* “Purple fringing”

- Le terme “purple fringing” fait référence à un type d’aberrations chromatiques souvent observé en photographie.
- Sur les CCDs et les capteurs CMOS, ce type d’aberrations chromatiques peut avoir plusieurs origines.
- Une des causes vient des micro-lentilles utilisées pour focaliser la lumière.
- Ces lentilles sont en général calibrées pour focaliser la lumière verte. Les lumières rouge et bleue seront alors incorrectement focalisées.
- C’est un problème qui est uniforme sur les caméras.
- Il est plus sévère sur les caméras avec de petits pixels.
- L’autre origine peut venir du démosaïquage dépendant du type d’algorithme utilisé.

“Seam noise”

- Les CCDs à lecture rapide utilisent plusieurs amplificateurs pour la lecture, chacun lisant une portion des charges de la matrice CCD.
- Ce type de lecture en parallèle est efficace, mais souffre d’un problème majeur appelé “seam noise”.
- Ce bruit provient du fait que chaque amplificateur présente ses propres caractéristiques de gain, d’offset et de non-linéarité.
- Ceci crée différentes zones dans l’image numérique (cf. exemple au transparent suivant).
- L’oeil est très sensible à ce type de bruit. Ainsi, pour une image avec un flux homogène, l’oeil est capable de détecter une différence de signal entre 2 pixels de seulement 0,2%.
- La correction de ce bruit est très délicate car il faut compenser pour les différences de gain, d’offset et de non-linéarité.

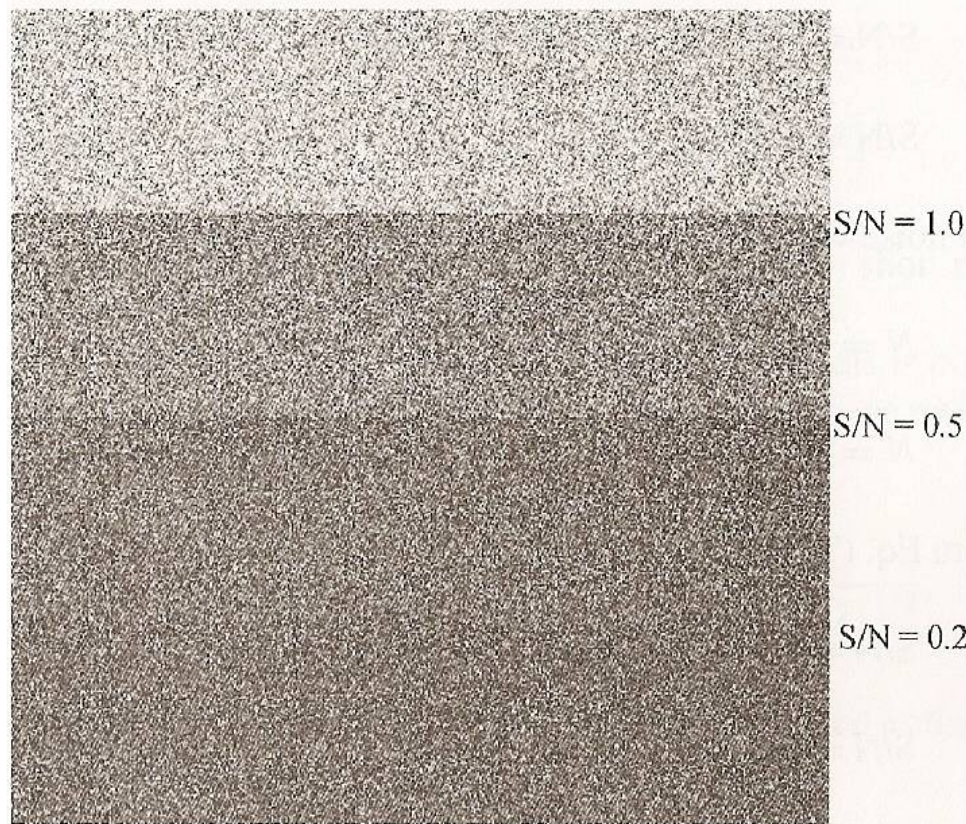
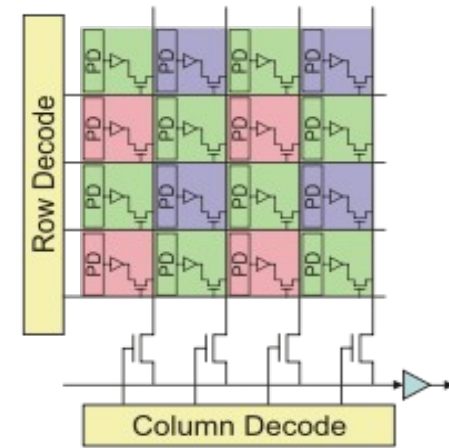


Image montrant l'effet du *seam noise* pour différents rapports signal sur bruit

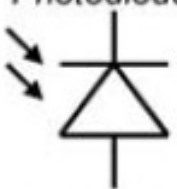
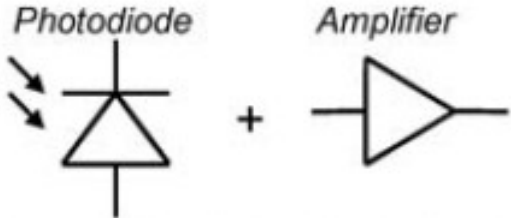
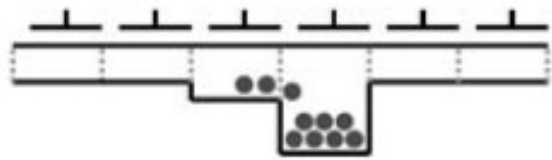
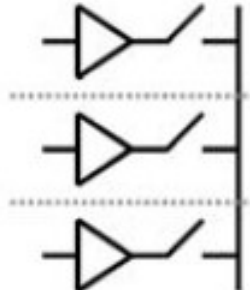
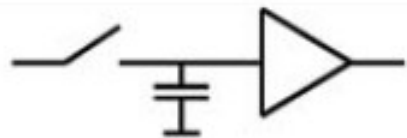
5 - Capteurs CMOS

- La **technologie Complementary Metal/Oxyde/Semiconductor** a été inventée juste avant les CCDs, mais le faible taux de fiabilité de cette technologie à l'époque n'a pas permis son expansion tout de suite.
- La technologie CMOS est maintenant **très bien maîtrisée**.
- Elle est **au coeur de tous les circuits intégrés modernes**.
- Elle a l'avantage d'être bien **miniaturisable**, de faibles coûts et de faible consommation.
- L'idée de capteurs CMOS en tant que matrice de pixels photo-sensibles remonte à ~50-60 ans.
- De nos jours, les capteurs CMOS ont remplacé les capteurs CCD dans bons nombres d'applications commerciales à destination du grand public et dans certains secteurs industriels.

- Comme les CCDs, les **capteurs CMOS** se présentent sous forme de **matrice de pixels** qui vont permettre d'échantillonner une scène.



- Une différence majeure vient du fait que **chaque pixel contient une photo-diode** (qui sert à la conversion photon-charge et au stockage des charges) **et un pré-amplificateur** qui va permettre de **convertir les charges en tension dans le pixel lui-même**.
- L'information de chaque pixel peut ainsi être **lue de manière indépendante sans faire de transfert**. Ce qui fait que le **temps de lecture est fortement réduit**.
- **Lecture de la charge Q non destructive**. Possibilité de faire plusieurs mesures et de moyenner le résultat afin de réduire le bruit.
- Une autre différence majeure vient du fait que **la photo-diode peut être constituée d'un matériau autre que le silicium**. Ceci permet une grande versalité d'**applications à différentes longueurs d'onde**.

	CCD Approach	CMOS Approach
Pixel	<p><i>Photodiode</i></p>  <p>Charge generation and charge integration</p>	<p><i>Photodiode</i> + <i>Amplifier</i></p>  <p>Charge generation, charge integration and charge-to-voltage conversion</p>
Array Readout	 <p>Charge transfer from pixel to pixel</p>	 <p>Multiplexing of pixel voltages: Successively connect amplifiers to common bus</p>
Sensor Output	 <p>Output amplifier performs charge-to-voltage conversion</p>	<p>Various options possible:</p> <ul style="list-style-type: none"> - no further circuitry (analog out) - add. amplifiers (analog output) - A/D conversion (digital output)

Comparaison entre capteurs CCD et CMOS

<http://www.youtube.com/watch?v=nxUDHcZI1uo>

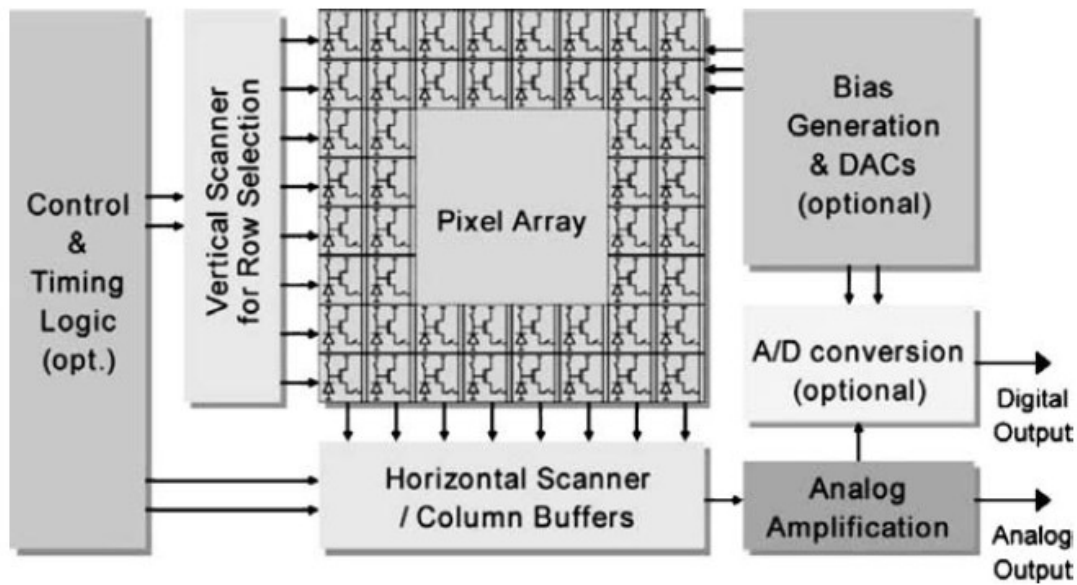
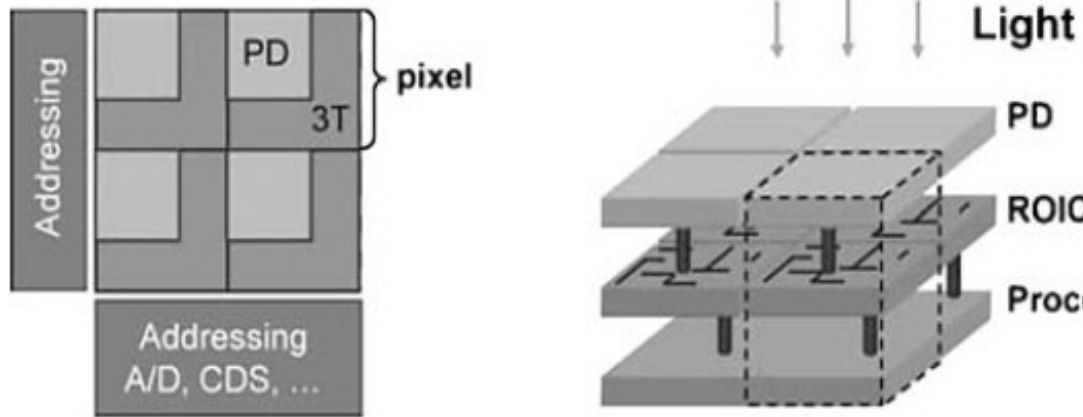


Figure 2. Block diagram of a generic CMOS sensor.



- L'utilisation de la **technologie CMOS** permet d'**intégrer une caméra complète** (matrice, scanners horizontal & vertical, CAN, etc...) **sur un même support silicium.**

TABLE I
Detector materials available for large-format CMOS hybrids (SCAs)

Detector material	Spectral range ^(a) (μm)	Operating temperature ^(b) (K)
Si PIN	0.4–1.0	~200
InGaAs ^(c)	0.9 ^(d) –1.7	~130
HgCdTe ^(c)		
1.7 μm	0.9 ^(d) –1.7	~140
2.5 μm	0.9 ^(d) –2.5	~90
5.2 μm	0.9 ^(d) –5.2	~50
10.0 μm	5.0–10.0	~25
InSb	0.4–5.2	~35
Si:As IBC (BIB)	5.0–28.0	~7

(a) Long wave cutoff is defined as 50% QE point.

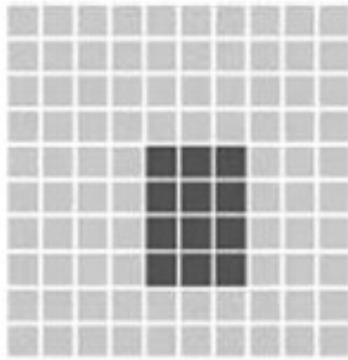
(b) Approximate detector temperatures for dark currents $\ll 1$ electron/second.

(c) Requires special packaging due to thermal contraction mismatch between detector and ROIC.

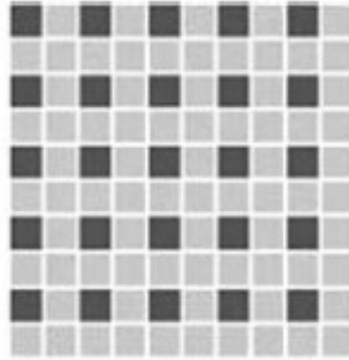
(d) Spectral range can be extended into visible range by removing substrate.

Exemple d'un APS 3T (gauche) et d'un SCA 3-D (droite)

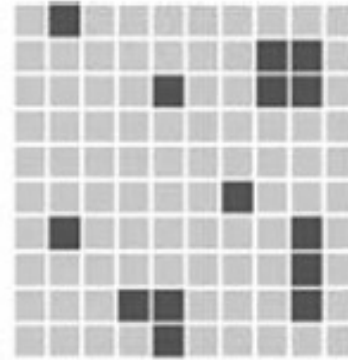
Mode de lecture



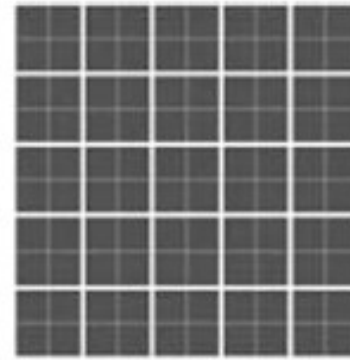
window /
guide mode



subsampling



random access



binning

Schéma montrant les modes de lecture principaux des capteurs CMOS actuels

Capteur CMOS monolithique (APS)

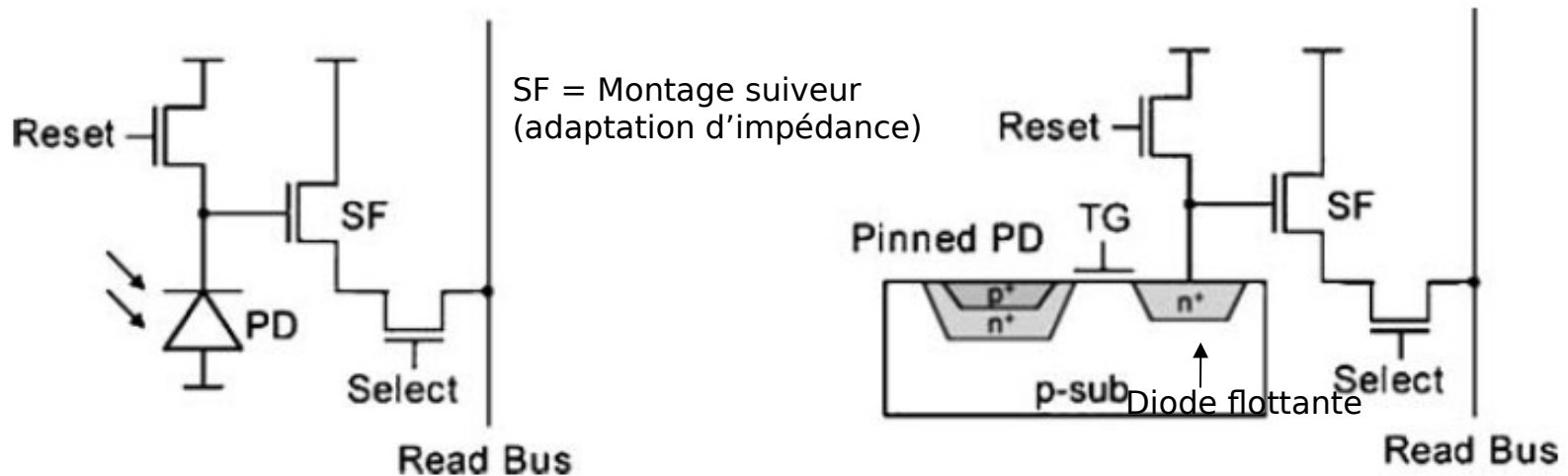
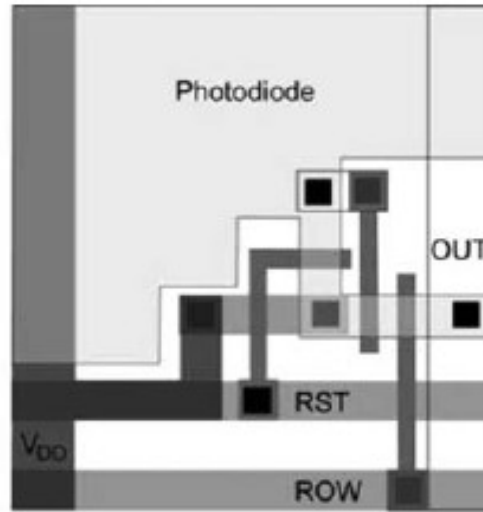
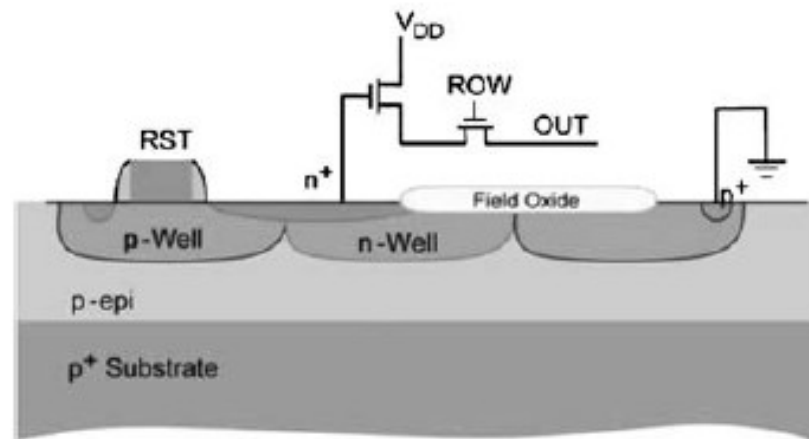


Schéma de 2 types d'APS utilisant 3 transistors 3T (gauche) et 4 transistors 4T (droite)

- Le **capteur CMOS** est dit **monolithique** lorsque la photo-diode et le circuit de lecture sont faits à base de silicium. On parle alors d'**Active Pixel Sensor** ou APS.
- Leur **sensibilité** est **limitée au visible et proche IR**. Ils sont opérés en **front-illuminated** - réduction de l'efficacité quantique.
- Les capteurs 4T et 3T utilisent normalement un obturateur glissant.
- Le capteur 4T utilise une chaîne type CDS.
- Le **facteur d'occupation de la photo-diode** sur un pixel est **<100%**, car le circuit de lecture est monté sur le pixel également.



(a)



(b)

Exemple d'un APS 3T

Capteur CMOS hybride (Sensor Chip Assembly - SCA)

- Les **capteurs CMOS hybrides** sont composés de 2 parties :
 - × Une matrice de pixels assurant la collection des charges
 - × Le circuit de lecture (*Readout integrated circuit* - ROIC)
- Les 2 parties sont reliées grâce à des liaisons en Indium (*Indium bump interconnection*)
- Les photo-diodes peuvent être faites dans un matériau différent que le silicium (cf. le prochain transparent).
- Leur efficacité quantique est très bonne.
- Le **taux d'occupation de la photo-diode est 100%**.

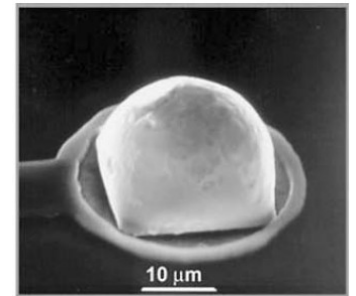


Image d'un *Indium bump*

Obturation

- La **présence d'APS par pixel** rend l'utilisation d'**obturateur mécanique inutile** sur les capteurs CMOS.
- On utilise à la place un **obturateur électronique** : type **instantané** (scènes avec mouvements rapides) ou type **glissant** (scènes lentes ou statiques).

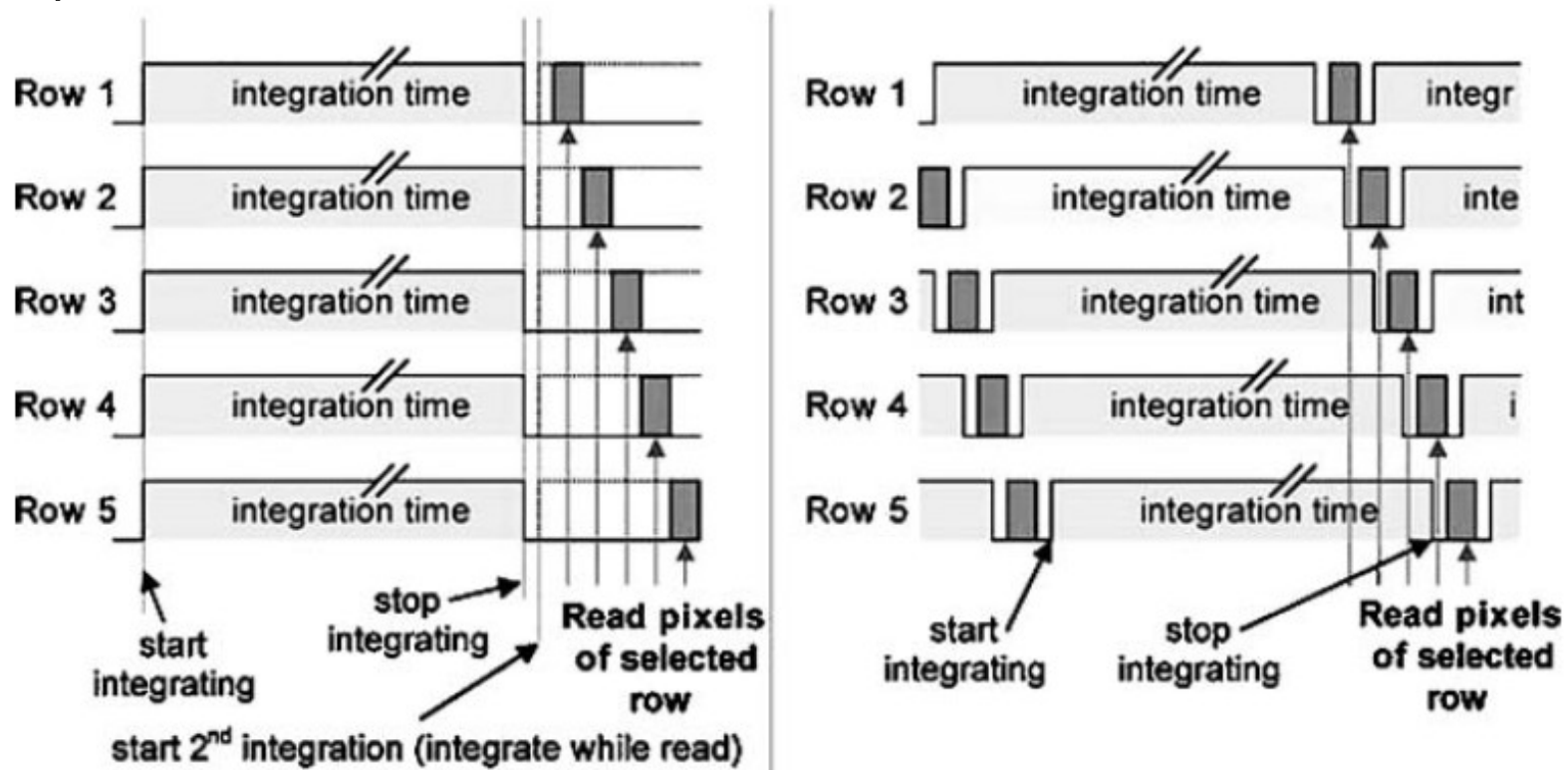


Schéma expliquant le fonctionnement d'un obturateur instantané (gauche) et glissant (droite)

- L'utilisation d'un obturateur glissant (*rolling shutter*) peut créer des aberrations :

- × déformations de l'image

- × effet de gelée ("jello effect") - vibration de l'image

- × exposition partielle (pour des mouvements rapides et des flashes de lumière)



Images montrant l'effet de l'exposition partielle

http://www.youtube.com/watch?v=4IHlzRw_Oek

<http://www.youtube.com/watch?v=DB740IEkEkg>

Images montrant des déformations