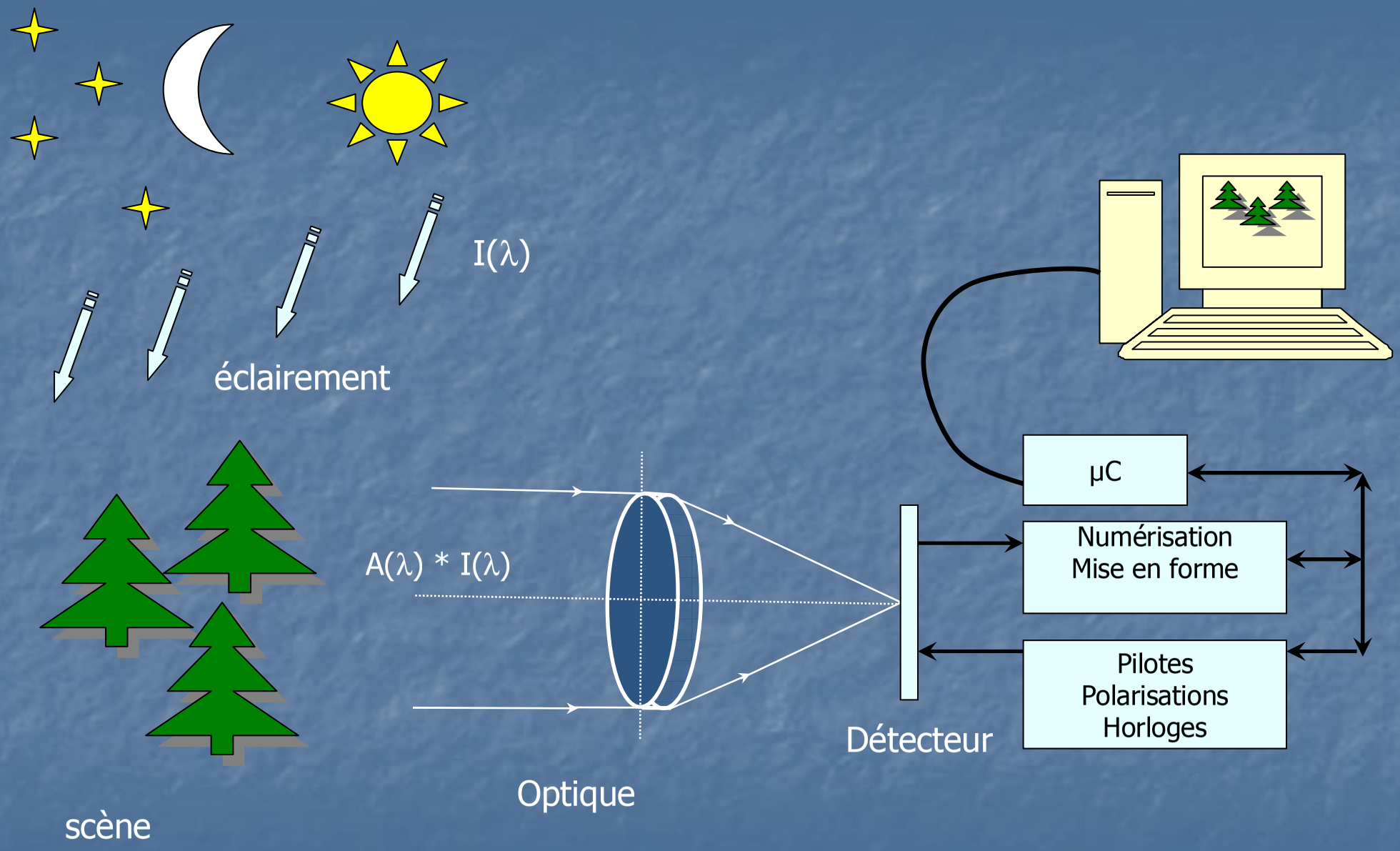
Détecteurs - capteurs d'images visible - NIR

(0.3µm à 1.1µm)

Par Cyril Cavadore , Thalès Optronique, DT-GOAL

Cours Sup-optique, 2003-2004

Chaîne objet - détecteur



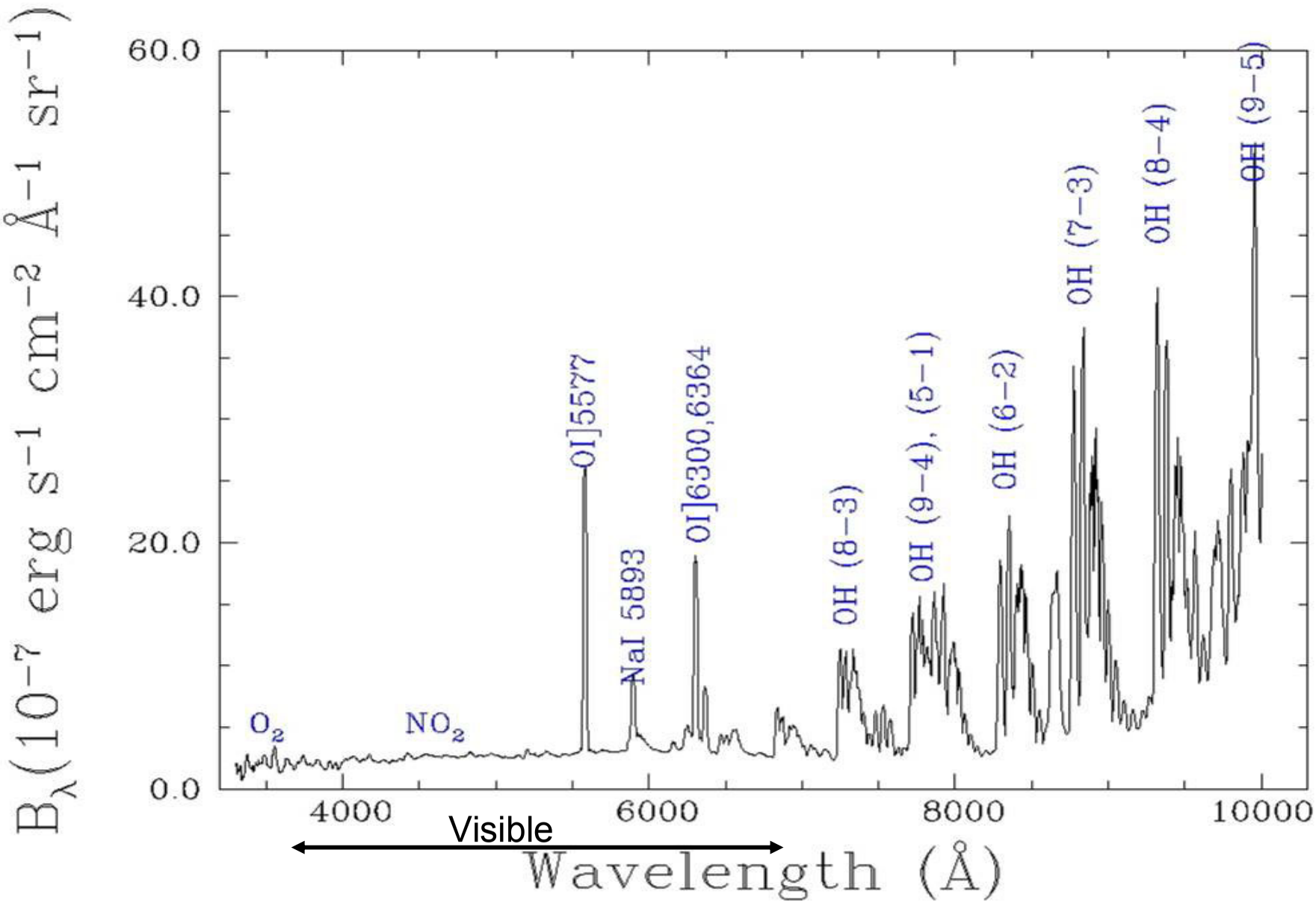
Niveaux d'éclairement de jour - Soleil (corps noir a 5800°K)

Aspect	Eclairement (Ph/s/m²) 0.4 – 0.7µm	Eclairement (Lux)
Soleil (direct)	~ 10^{21}	100 000 – 130 00
Jour avec éclairage indirect du Soleil	~ 10^{20}	10 000 – 20 000
Jour couvert	~ 10^{19}	1000
Intérieur (Bureau)	~ 10^{18}	200 – 400
Jour très sombre	~ 10^{17}	100
Crépuscule	~ 10^{16}	10
Crépuscule avancé	~ 10^{15}	1

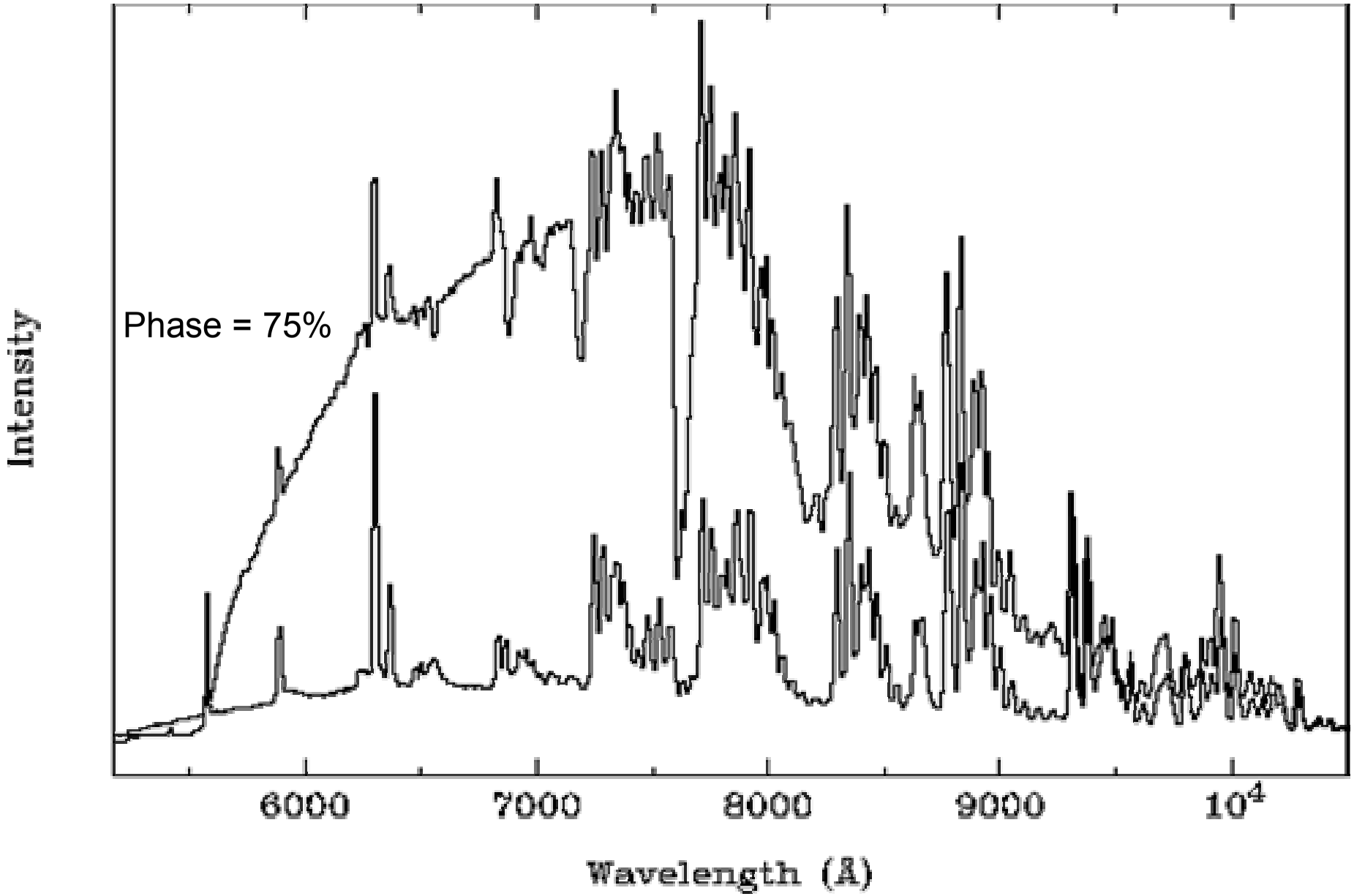
Niveaux de lumière nocturnes

Niveau	Aspect	Lune/ Nuages	Eclairement (Ph/s/m²) 0.4 – 0.7µm	Eclairement (mLux)	Probabilité d'occurrence
5	Très sombre	Couvert Nuages Nouvelle Lune	10^8	< 0.7	27.5%
4	Sombre	Pas de nuages Nouvelle Lune	10^9	0.7 - 2	27.5%
3	Intermédiaire	Pas de nuages Premier Quartier Lune	10^{11}	2 - 10	7%
2	Claire	Nuages Pleine Lune	10^{12}	10 – 40	24%
1	Très claire	Pleine Lune pas de nuages	10^{15}	40 - 1000	14%

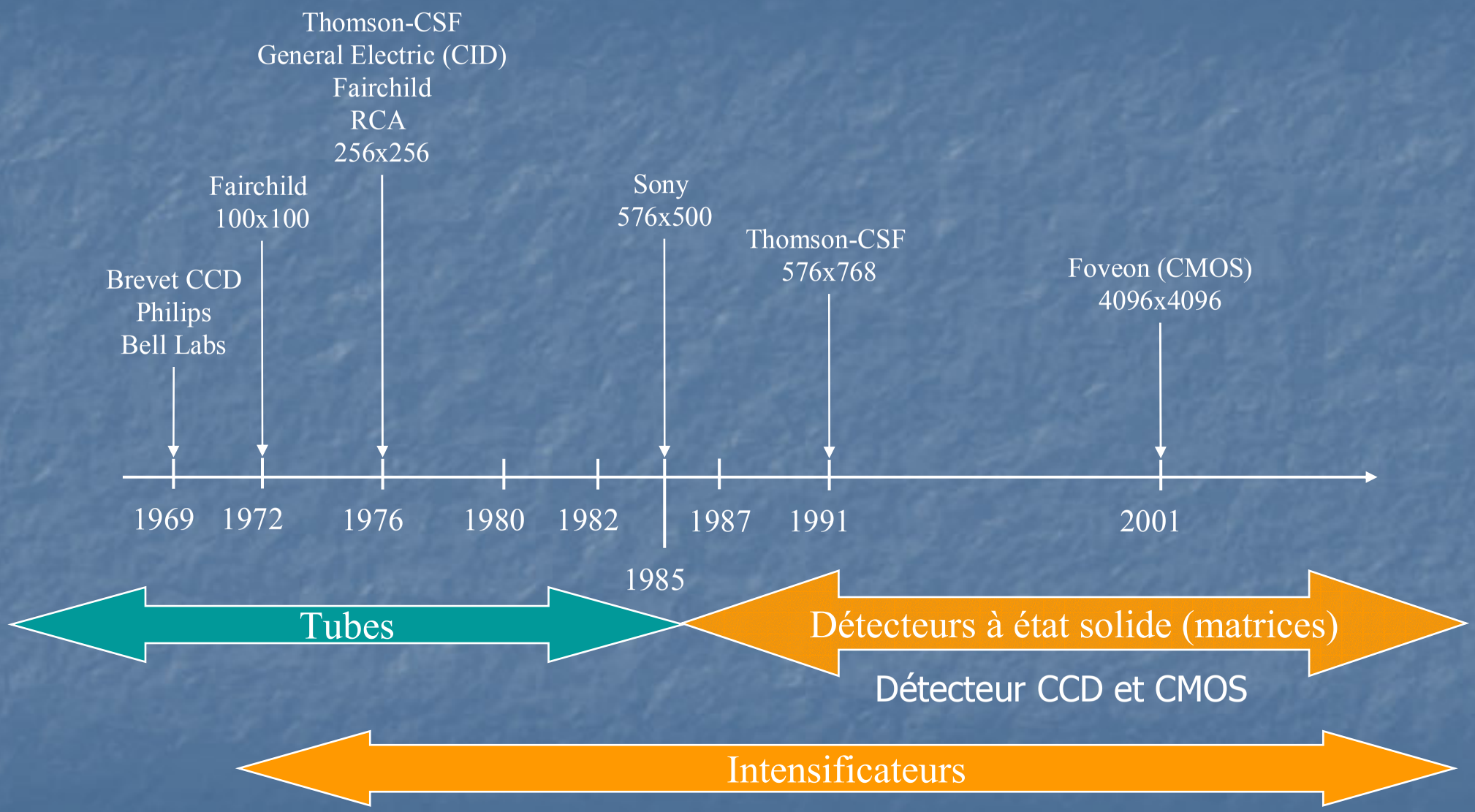
Réponse spectrale ciel nocturne



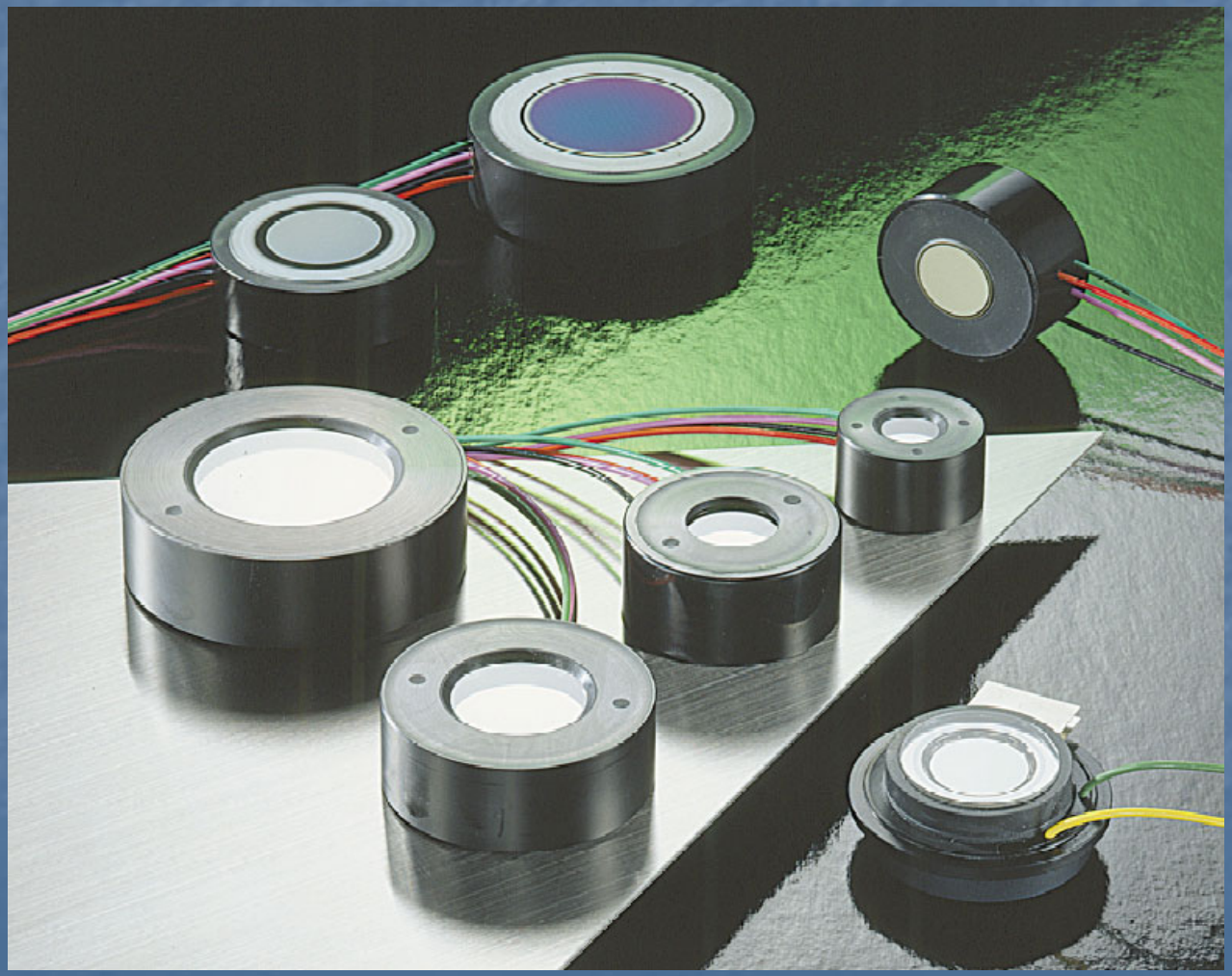
Effet de la Lune



Chronologie : évolution des imageurs visibles



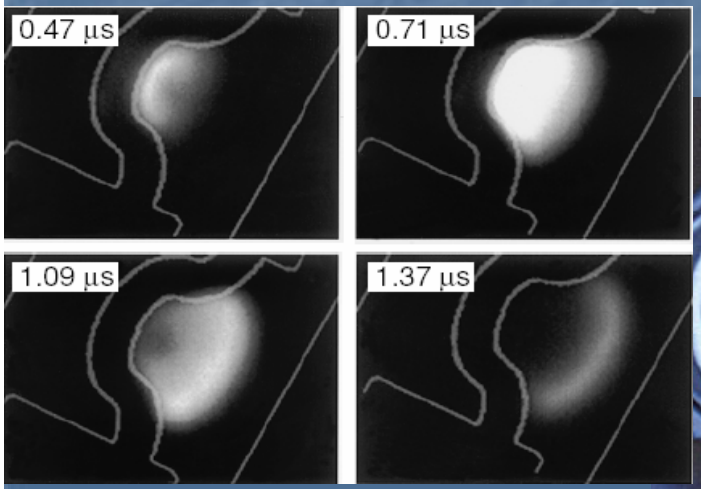
Les intensificateurs de Lumière - IL

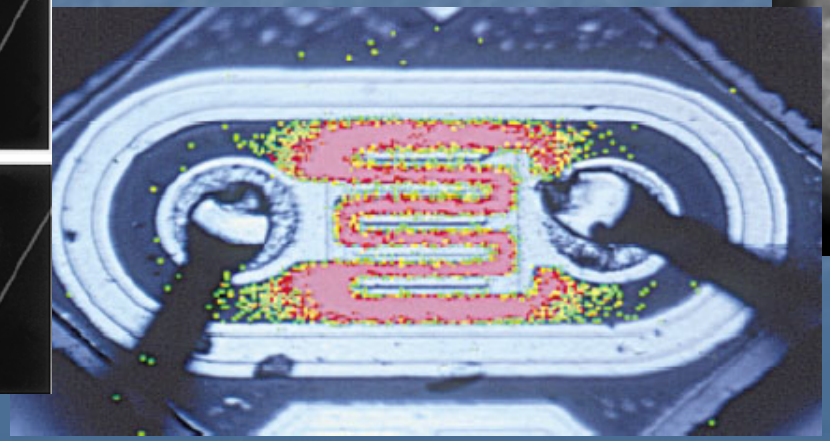


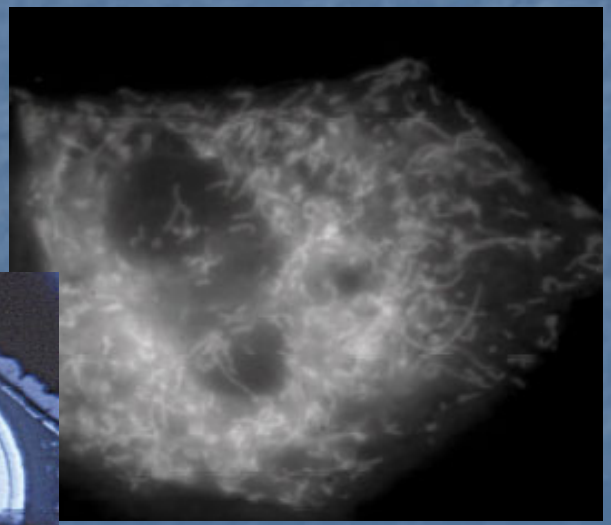
Les intensificateurs de lumière

Applications :

- vision de nuit (militaire / civil)
- Spectroscopie
- Imagerie par fluorescence (Biologie)
- Astronomie
- Electronique
- Contrôle de Semi conducteur







Systèmes basés sur les ILs

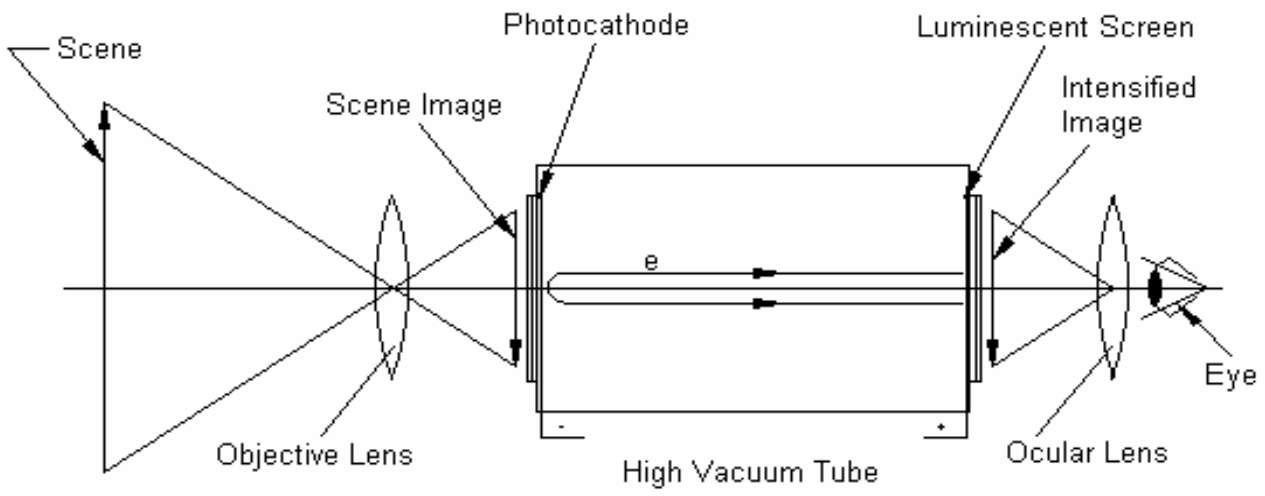


Fig. 1: Basic principle

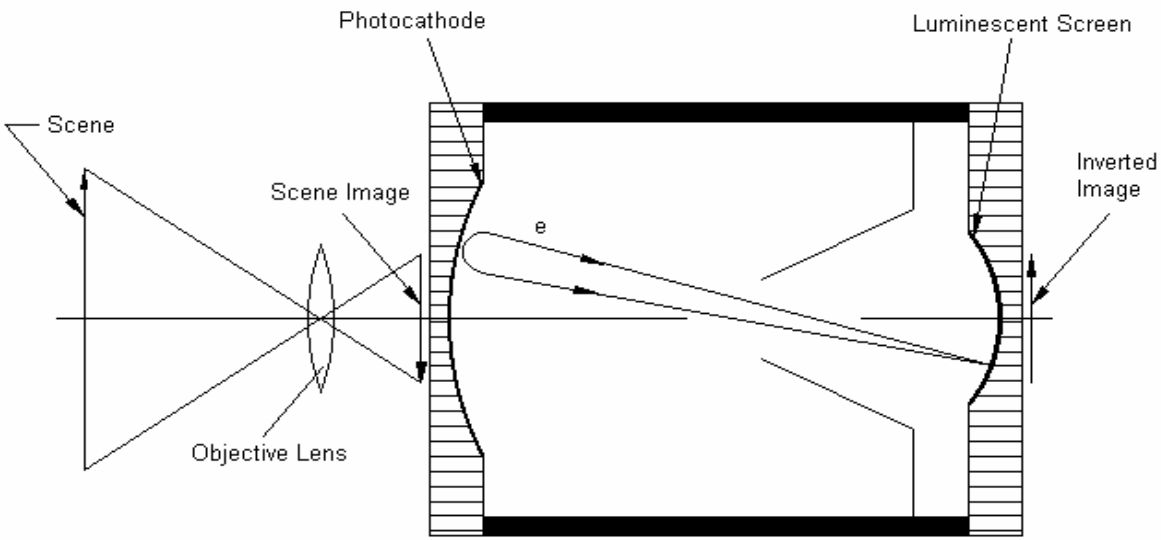


Fig. 3: Inverter image intensifier diode

- Amplification de la lumière
  - photocathode
  - un champ électrique
  - le vide
  - un système d'électrodes
  - un écran (phosphore)

1ère génération d'ILs

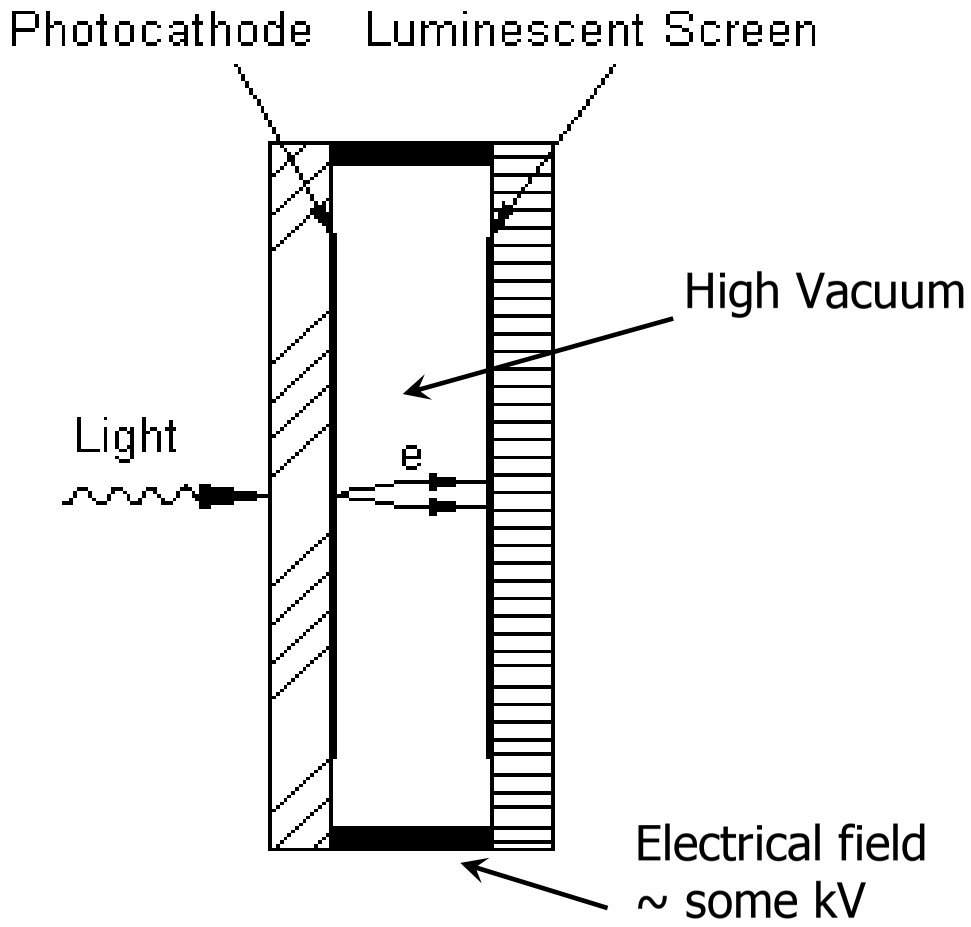


Fig. 2: Proximity focus image intensifier diode

Energie acquise par les électrons = plus grande luminosité de l'écran phosphore
Amplification de 1000 – 5000x

2ième génération d'ILs

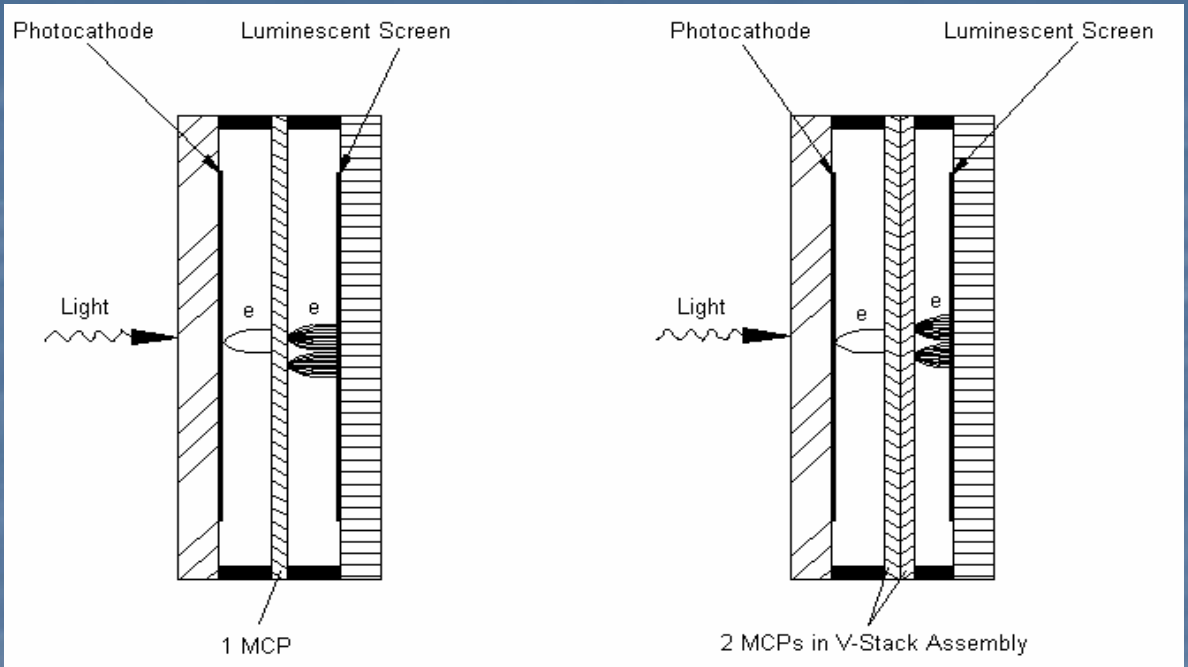


Fig.5: Proximity focus MCP image intensifiers

- Galette a micro canaux
- Plus compacts
- Amplification 20 000x
- Pas d'inversion d'image
- Double galette : gains de 10^7
- Plus sensible au Bruit d'anions et aux bruits thermiques

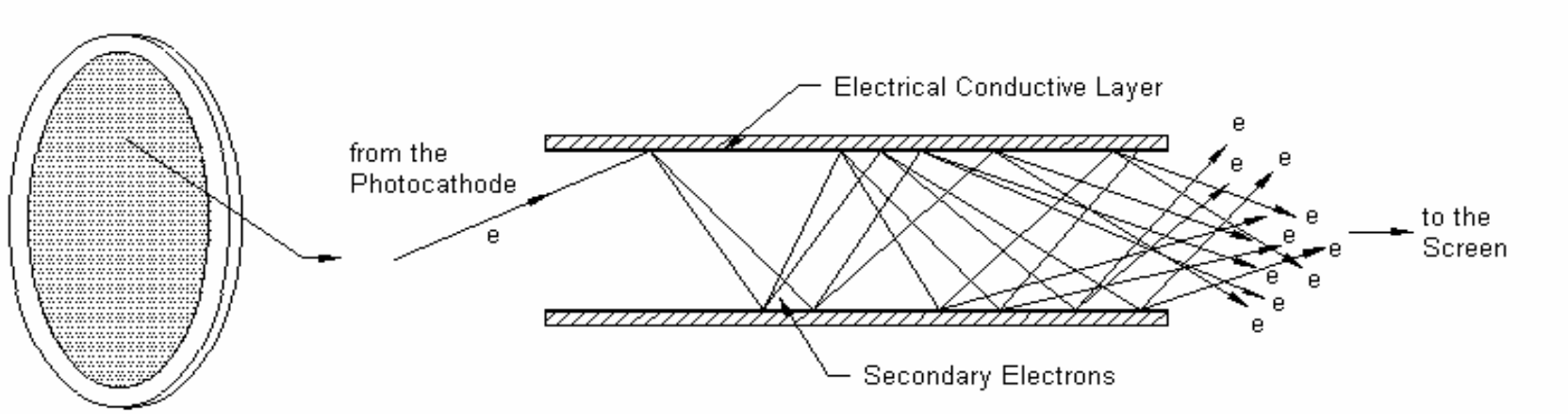
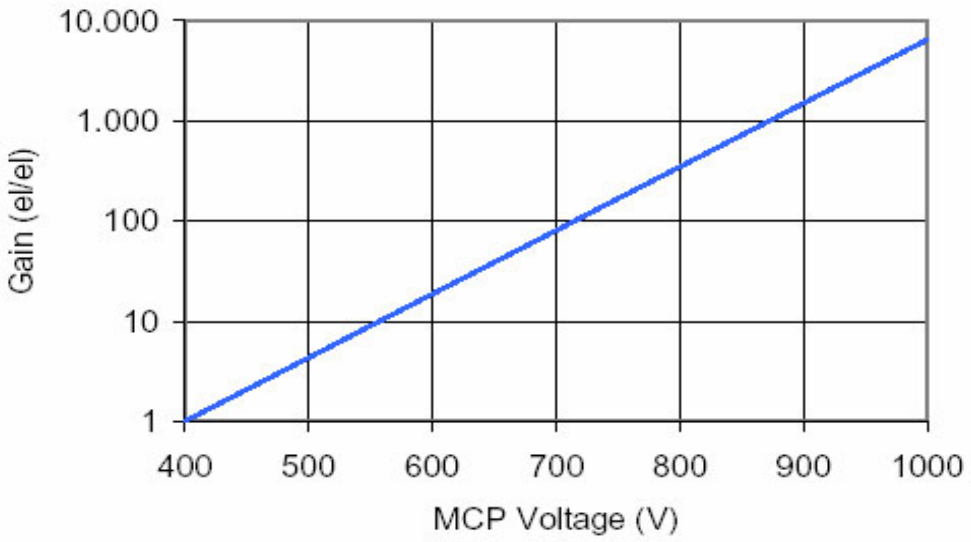
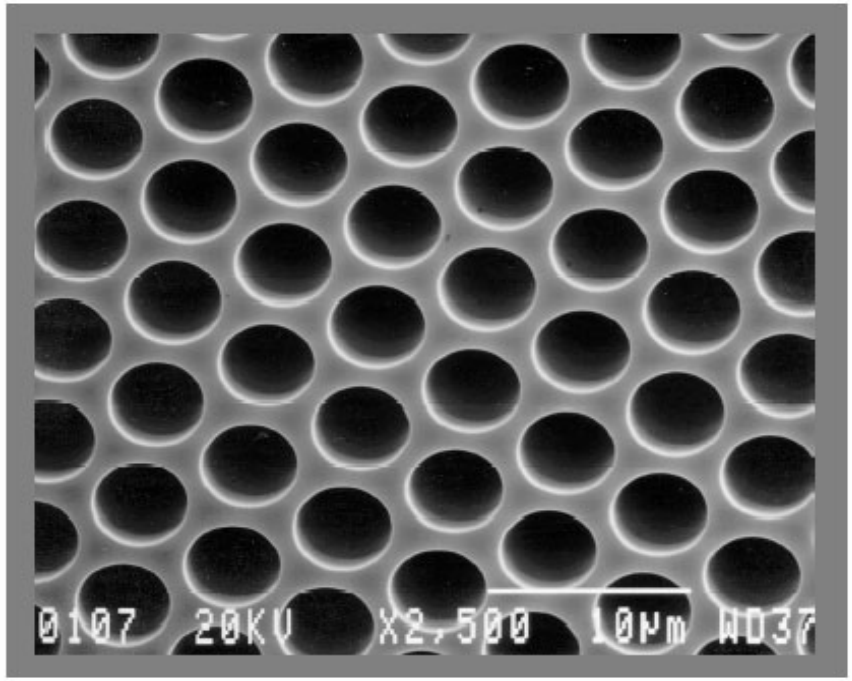


Fig. 4: Microchannel plate (MCP)

2ième génération d'ILs



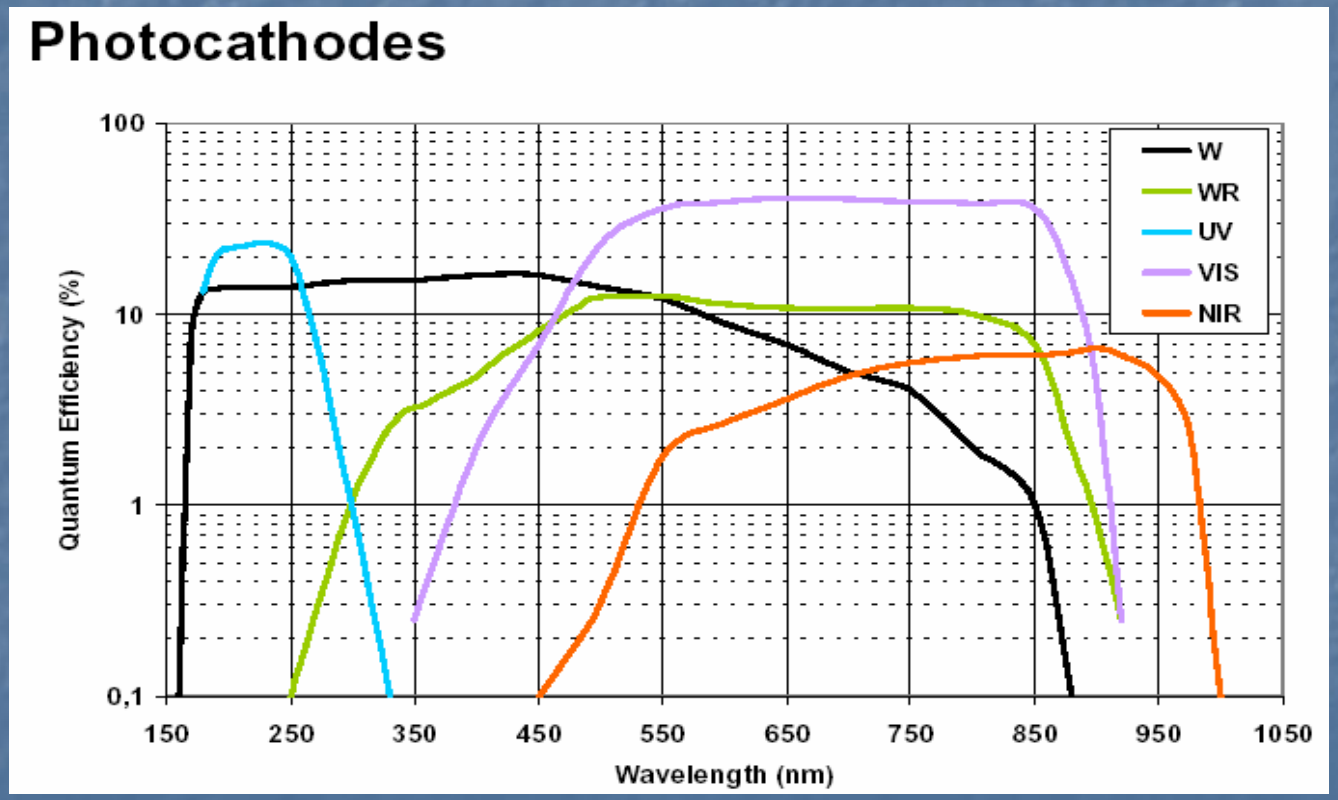
Surface



Galette de micro canaux

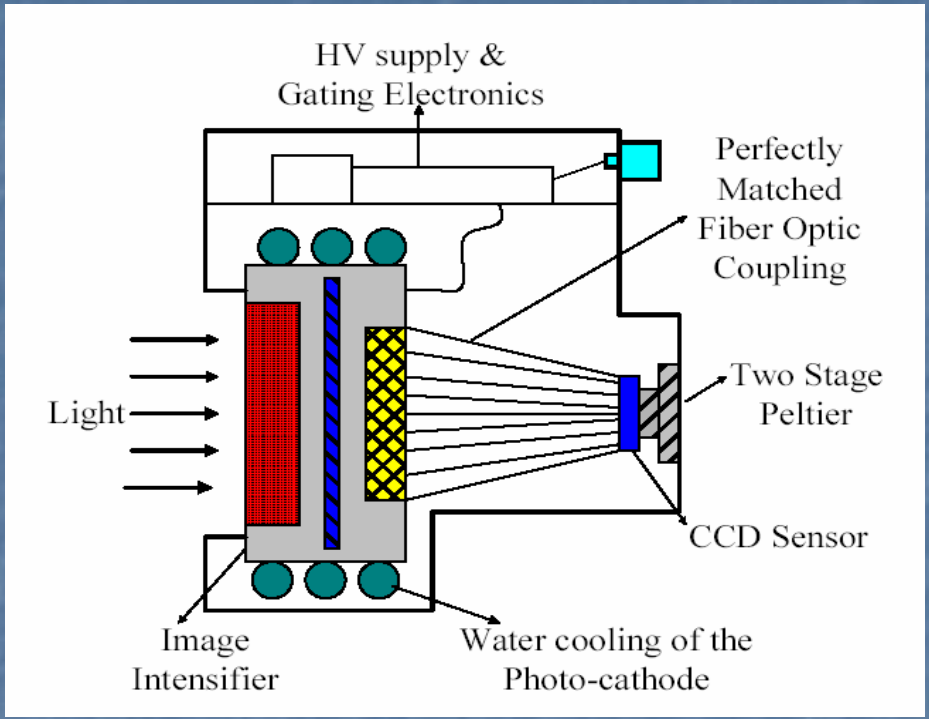
3ième génération d'ILs

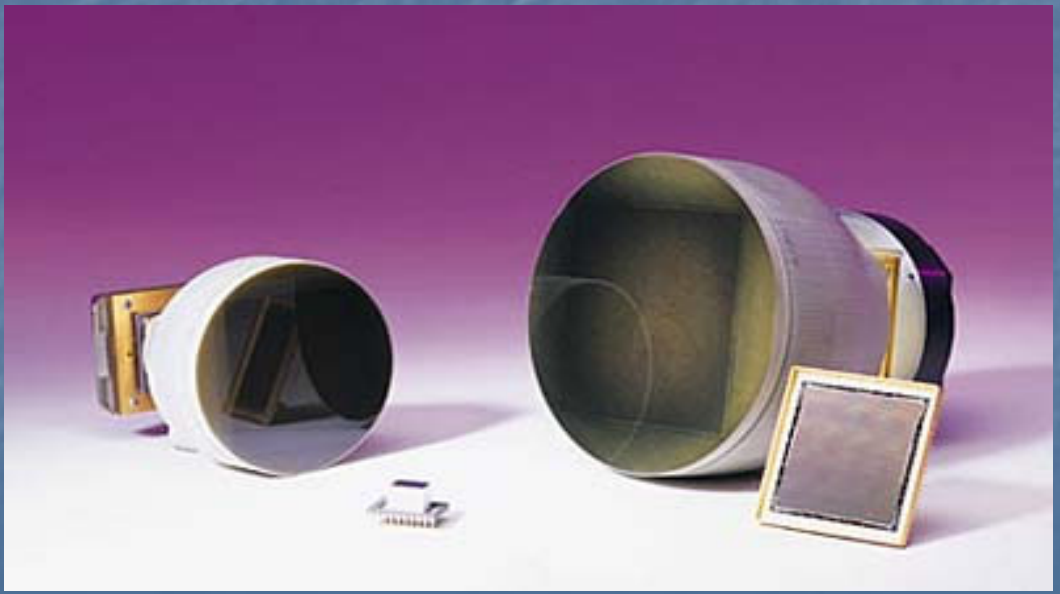
- Efforts sur le rendement quantique des photocathodes (1.200 µA/lm au lieu de 300 µA/lm)
- Gain de 30000 – 50000x



Photocathode Type	Spectral Response
Multialkali	Up to 900 nm
Extended red multialkali	Up to 950 nm
Bialkali	Up to 650 nm
Cs-Te	Up to 320 nm
Ag-O-Cs	Up to 1200 nm
GaAs (Cs)	Up to 920 nm
GaAsP (Cs)	Up to 720 nm

Couplage intensificateur - CCD



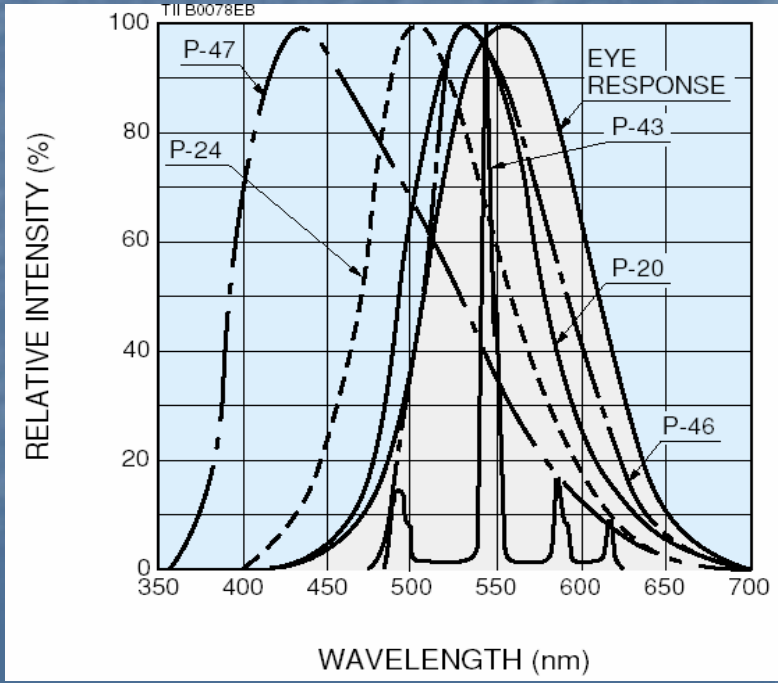


- Couplage écran – détecteur d'images
- Matrices de fibres optiques
- Cher, très cher !!

Générations d'IL (Comparaisons)

Critères et paramètres de choix d'un IL

- Diamètre d'entrée
  - Diam 11 à 40 mm
- Type de photocathode
  - Fonction de la réponse spectrale souhaitée
  - Alkali, biAlkali, GaAsp, CsTe…
- Transmission de la fenêtre d'entrée
- Inversion d'image ou pas
- Gain et nombre de galette de micro canaux (1,2 ou 3)
  - 10^3 – 10^7
- Résolution
- Ecran Phosphore
  - Couleur
  - Sensibilité
  - Temps de rémanence
- Fenêtre de sortie
  - Matériau
  - Couplage fibre optique CCD
  - Gating time (obturation)
    - 200 ps à 10ns



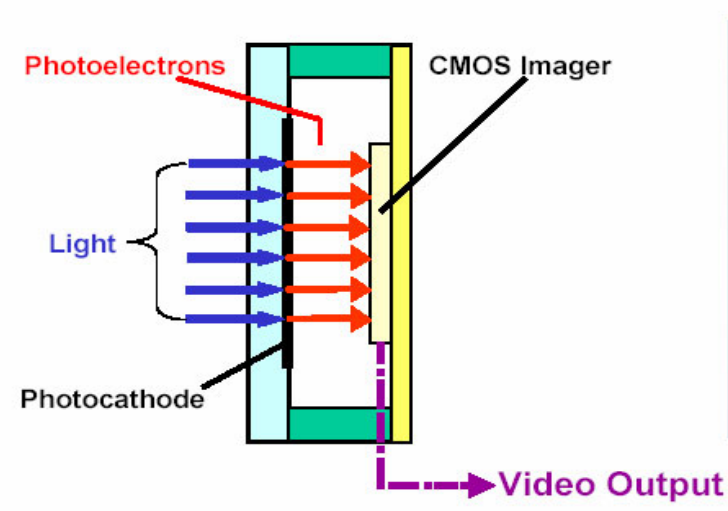
http://www.hpk.co.jp/eng/products/ETD/pdf/II_TII0001E02.pdf

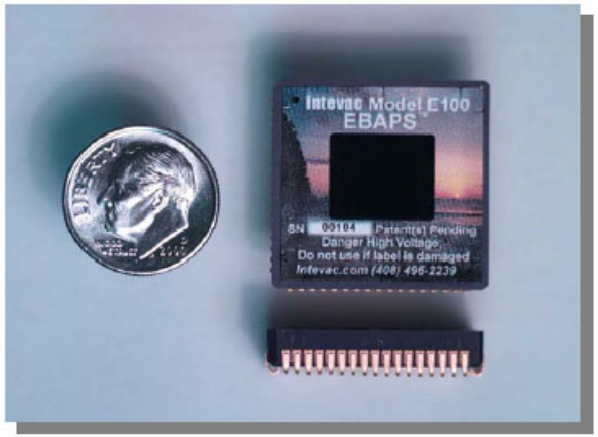
IL : avantages et inconvénients

- Gating (obturation) jusqu'à qq ns
- Sensibilité imbattable pour des cadences d'images vidéo, qq Hz
- Irremplaçable dans certaines applications
- Pas d'écran déporté
- Compact

- Durée de vie limité
- Prix (qq K€)
- Sensibilité a l'éblouissement
- THT
- Encombrement
- Sensible aux environnement humides
- Fragile

Futur : couplage direct avec des CCD, des APS ou EBAPS : l'écran tend à disparaître, ainsi que la matrice de fibres..

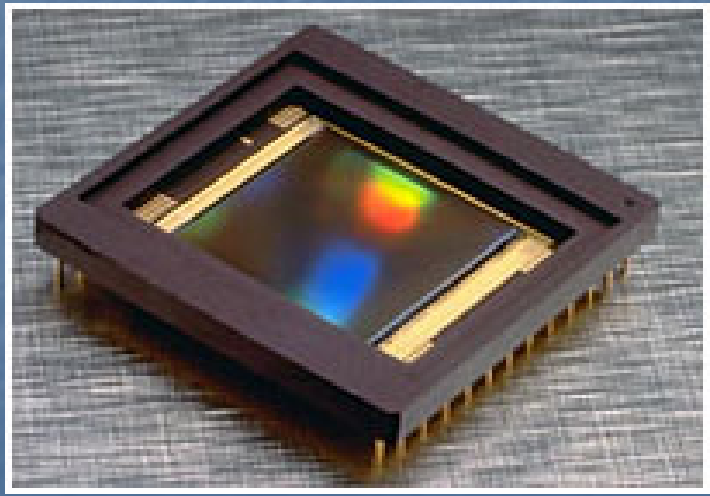


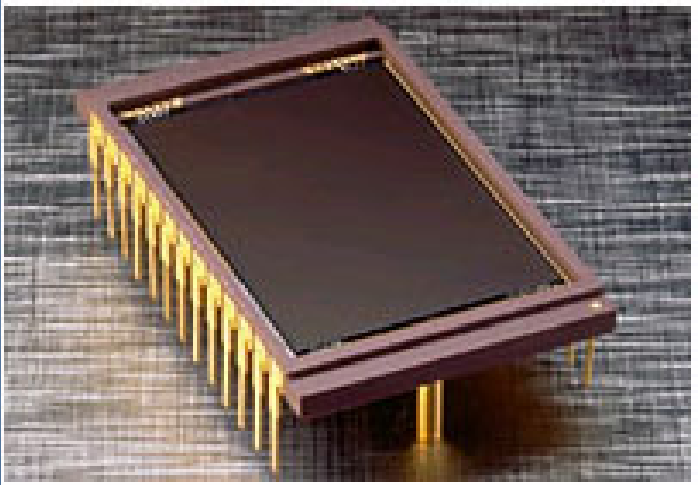


Photon-Processor™

Capteur d'images CCD

Charge Coupled Devices





Domaines d 'application des capteurs d 'image

- « Grand Public »
  - Caméscope, photographie numérique,
  - Caméra pour téléphones mobiles
- Bureautique
  - webcam, scanner, photocopieur, Fax
- Industriel
  - Sécurité, identification, contrôle
- Scientifique
  - Astronomie, Observation de la terre
  - Imagerie médicale
- Automobile
  - Anti-collision, rétroviseur

Domaines d 'application : des capteurs d'image

- Militaire
  - Poursuite et imagerie TV (OSF)
  - Pod de désignation (ATLIS)
  - Reconnaissance (PRESTO, RECO-NG)

Différences détecteur à état solide / tube – film
Discrétisation par des pixels

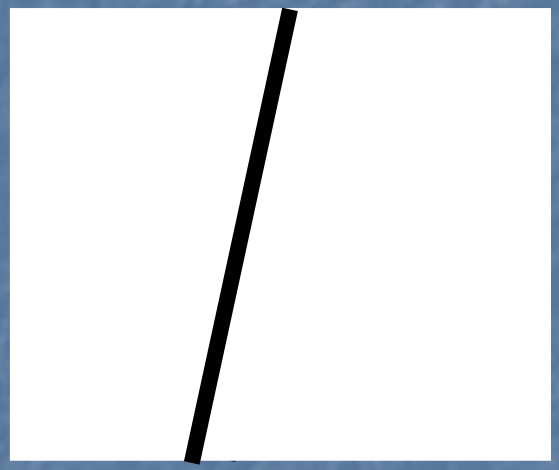


Image d'une ligne

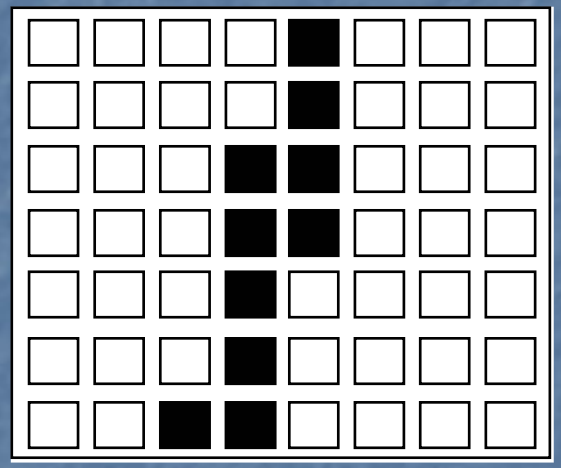
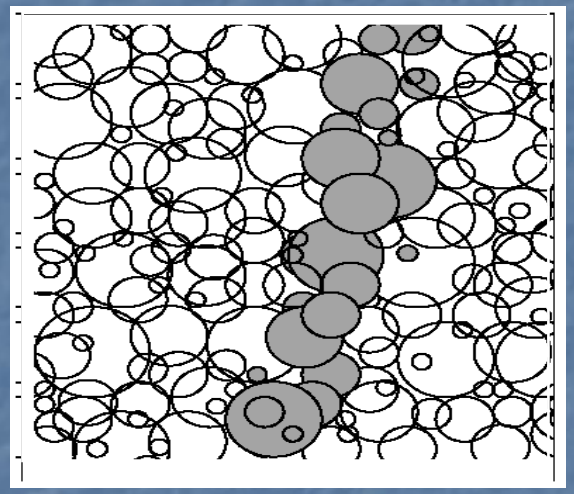


Image pixellisée

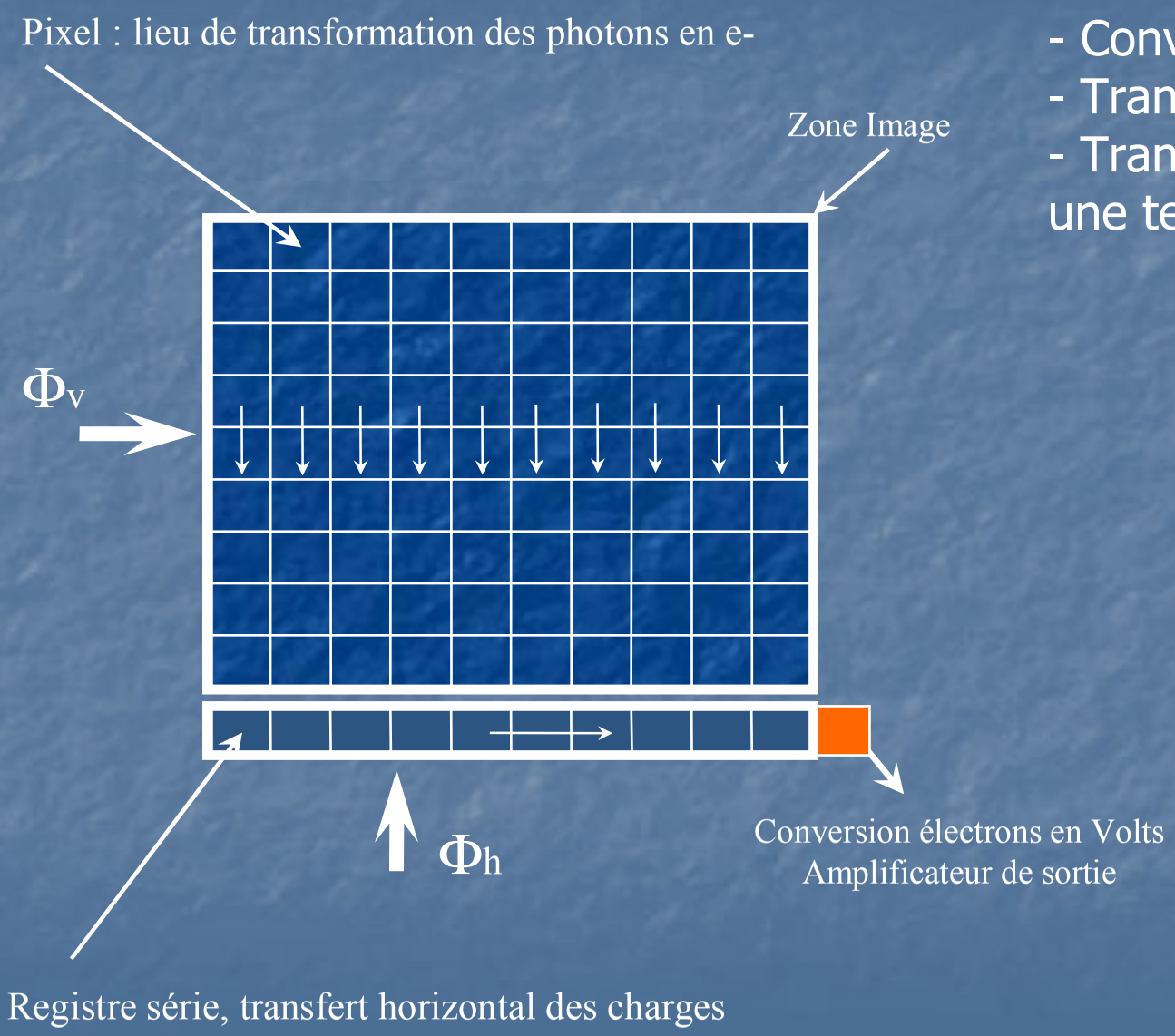
Taille Pixel de 5 à 20µm



Grain de film/photocathode

Taille de grain variable
~100 grains dans
l'équivalent d 'un pixel
10x10µm

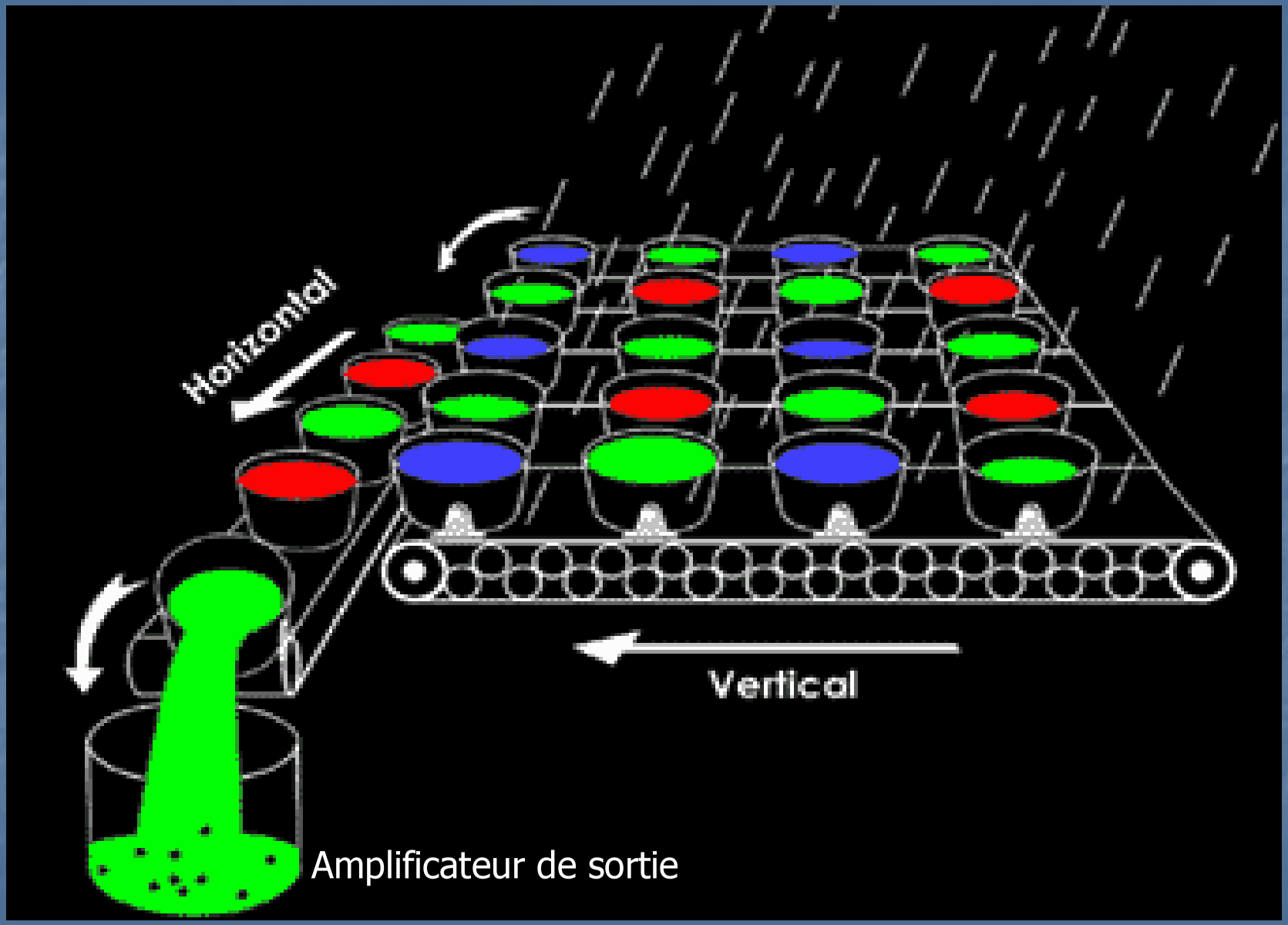
Principe de base de fonctionnement d'un CCD

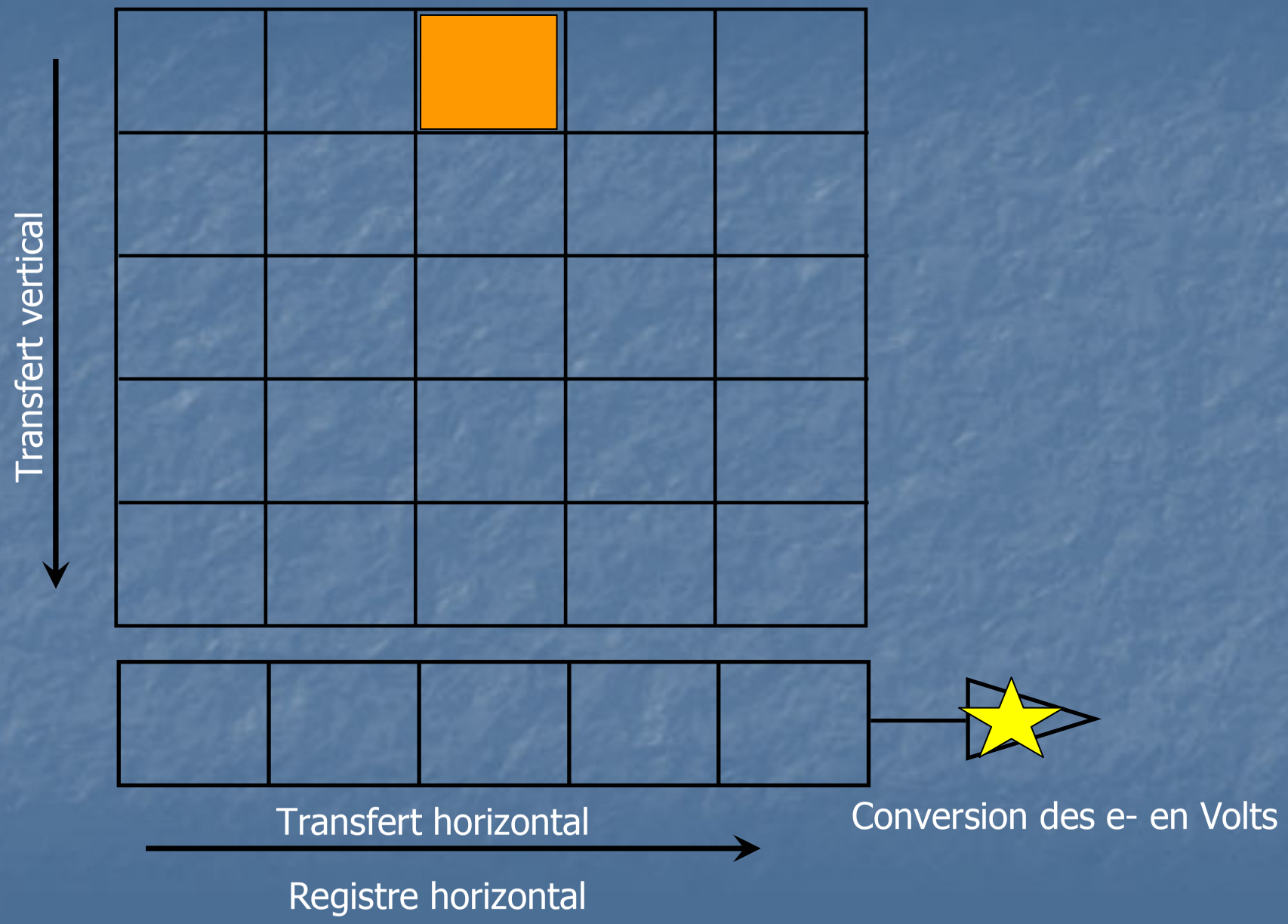


- Conversion photo électrons
- Transfert de charges
- Transformation électrons vers une tension

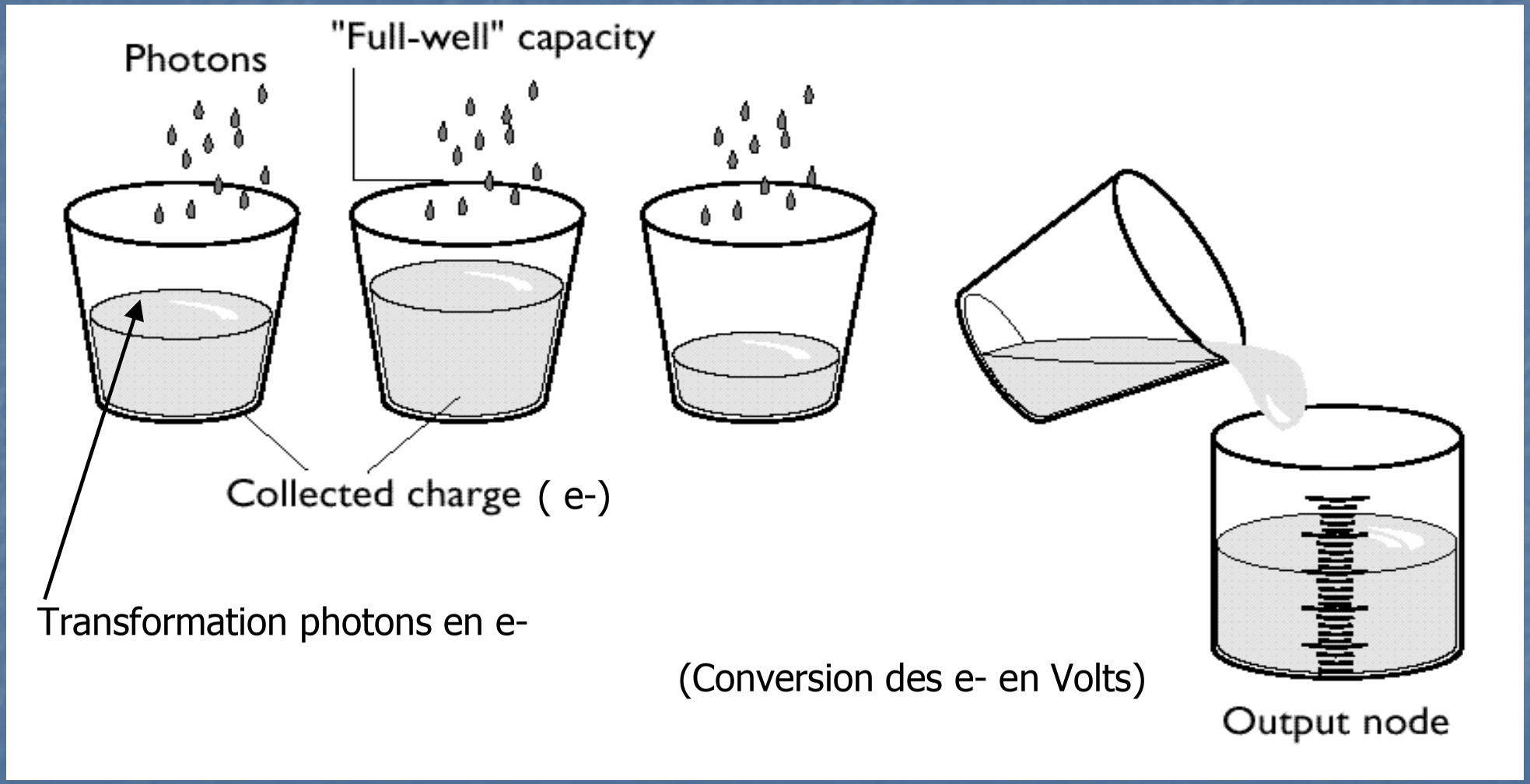
Finalité : une image

Analogie charges/liquide

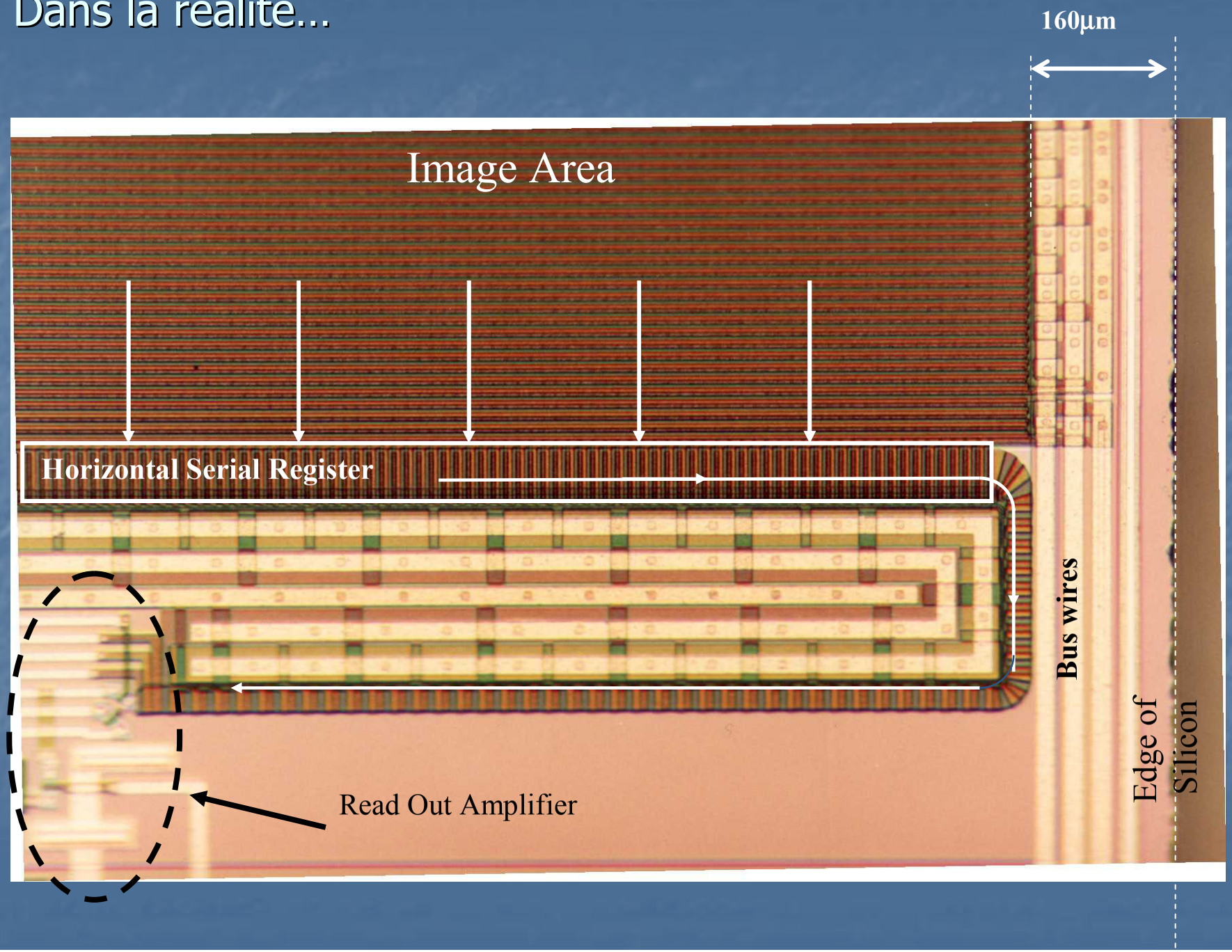



Transfert vertical
Transfert horizontal
Registre horizontal
Conversion des e- en Volts

Analogie Charges/Liquide - bucket/Seau



Dans la réalité…



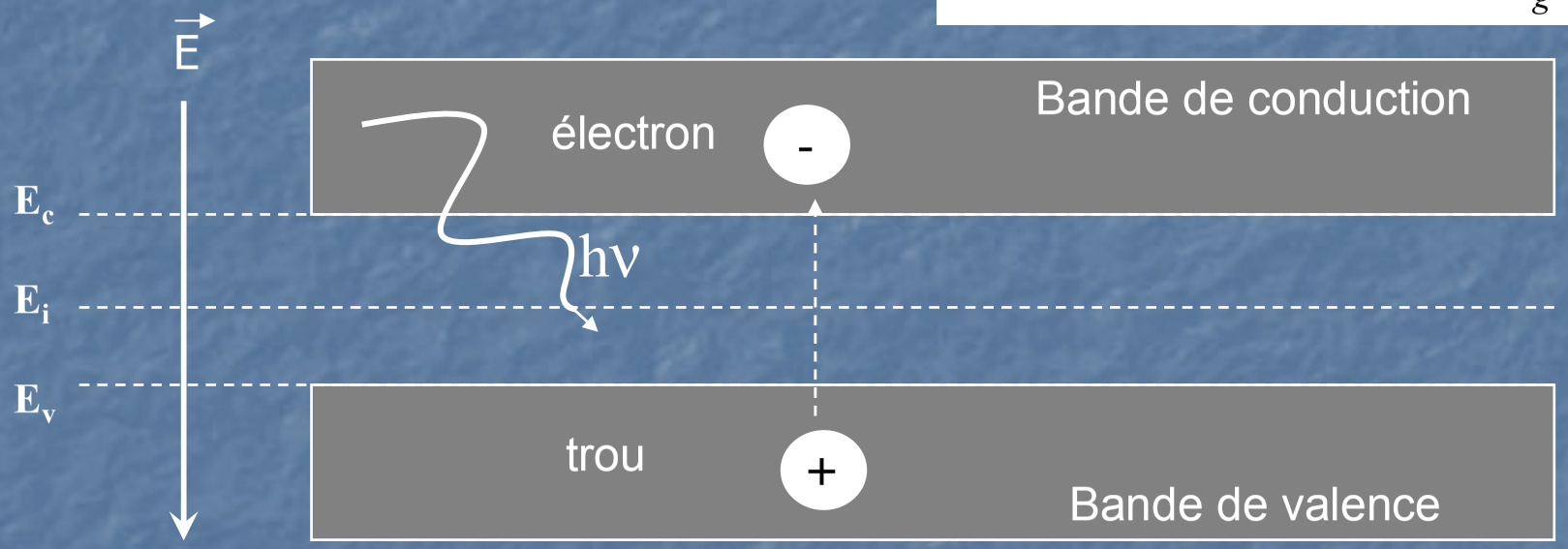
Effet photo-électrique dans un pixel Si

Transition possible si $h\nu_c > E_c - E_v$

Cas du silicium $E_c - E_v = 1.12\text{eV}$

Coupure haute : $\lambda_c < 1.1\mu m$

$$h\upsilon \geq E_g \quad \Rightarrow \quad \lambda_c = \frac{hc}{E_g} \cong 1{,}1\ \mu m$$



Coupure basse (UV)

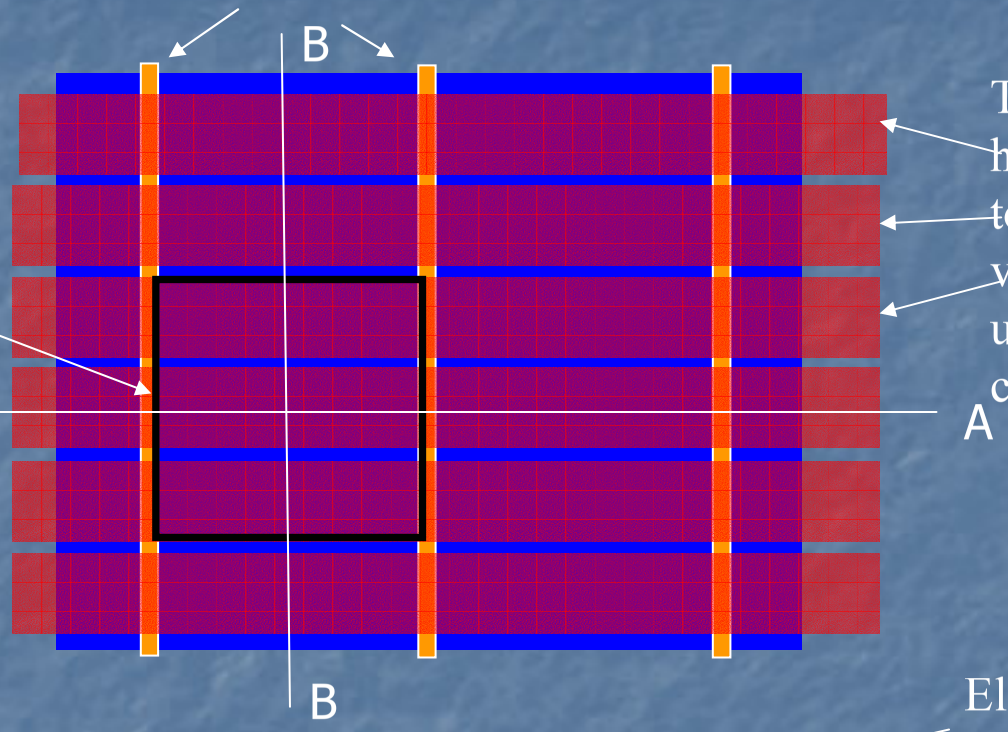
Causée par l 'absorption de l 'oxyde (~ 0,3µm) ou du PolySi (0,4µm)

Vue d'un pixel (3 phases)

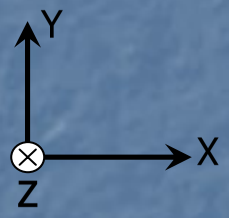
Channel stops to define the columns of the image

Plan View

One pixel
15µm x 15µm



Transparent horizontal electrodes to define the pixels vertically. Also used to transfer the charge during readout

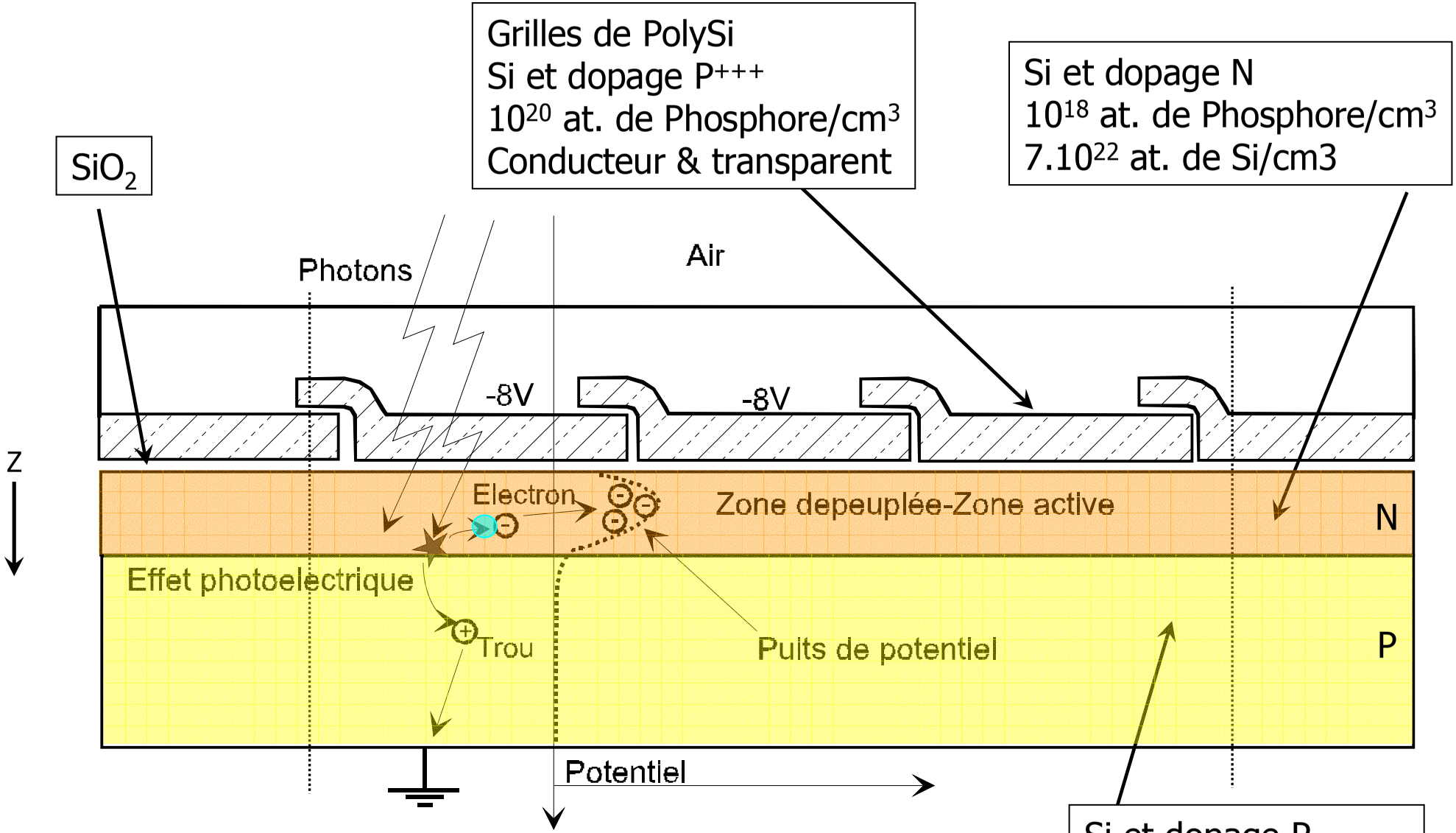


Cross section
AA

Electrode
Insulating oxide
n-type silicon

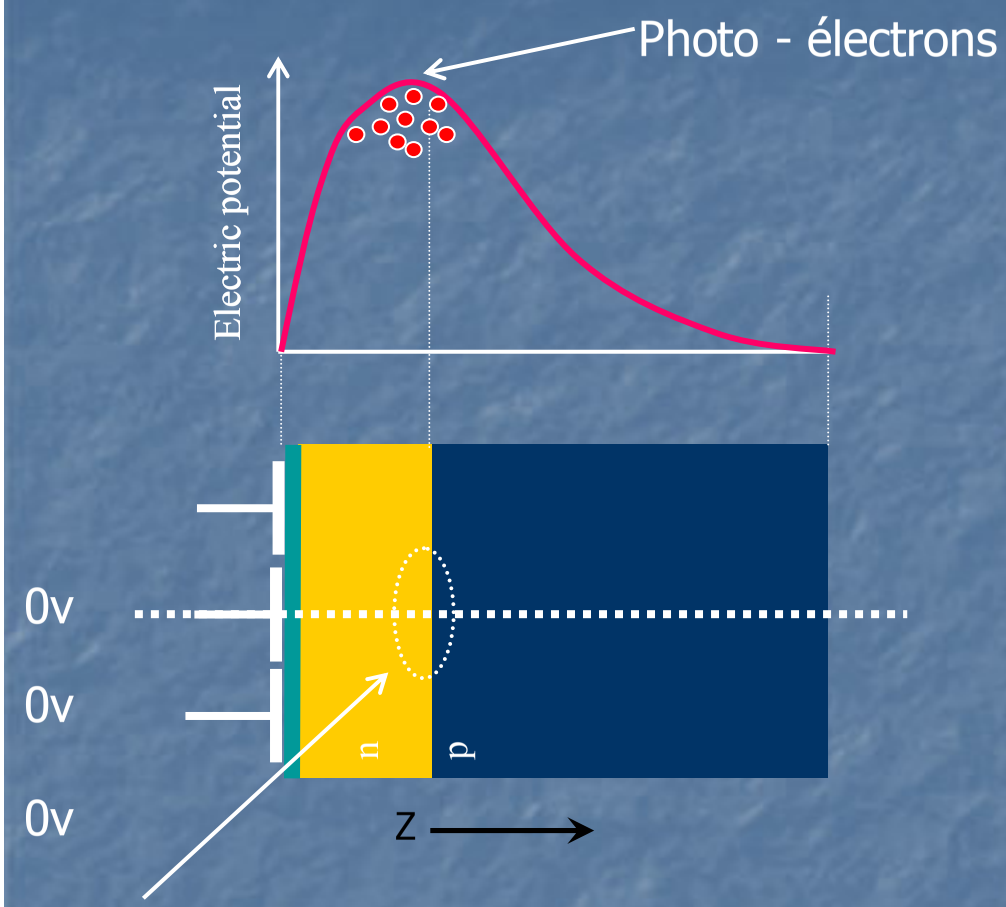
p-type silicon

Collection des charges dans un pixel : Capacité MOS



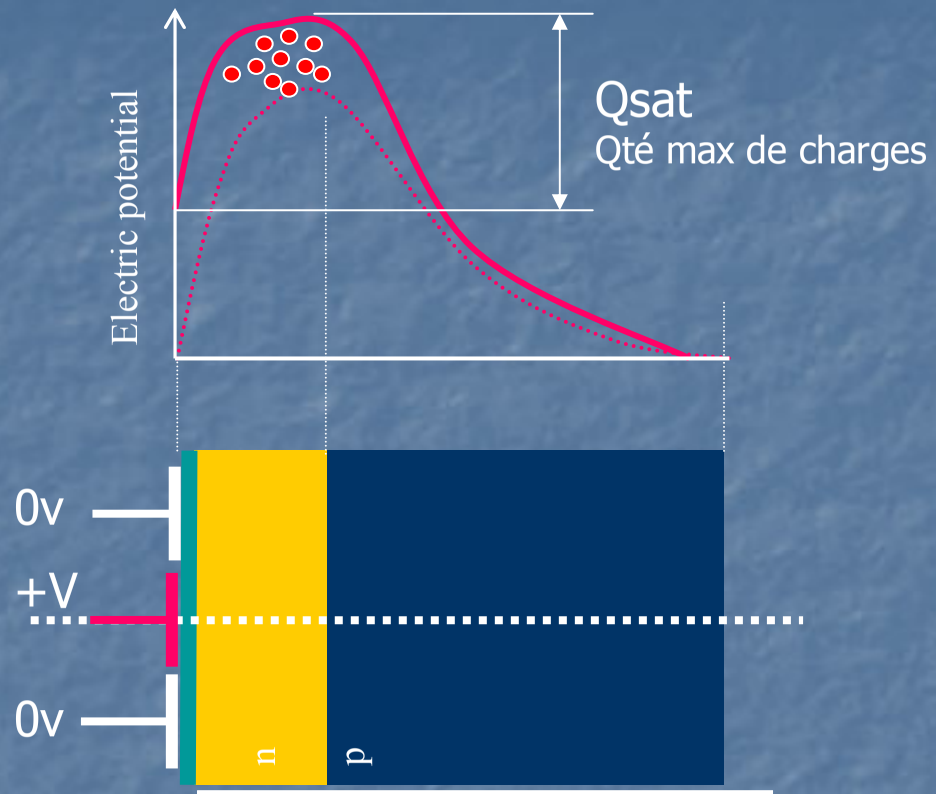
Coupe d'un pixel

Potentiel variable dans un pixel (3 phases)



Région de potentiel max
ou région de déplétion a la jonction P-N

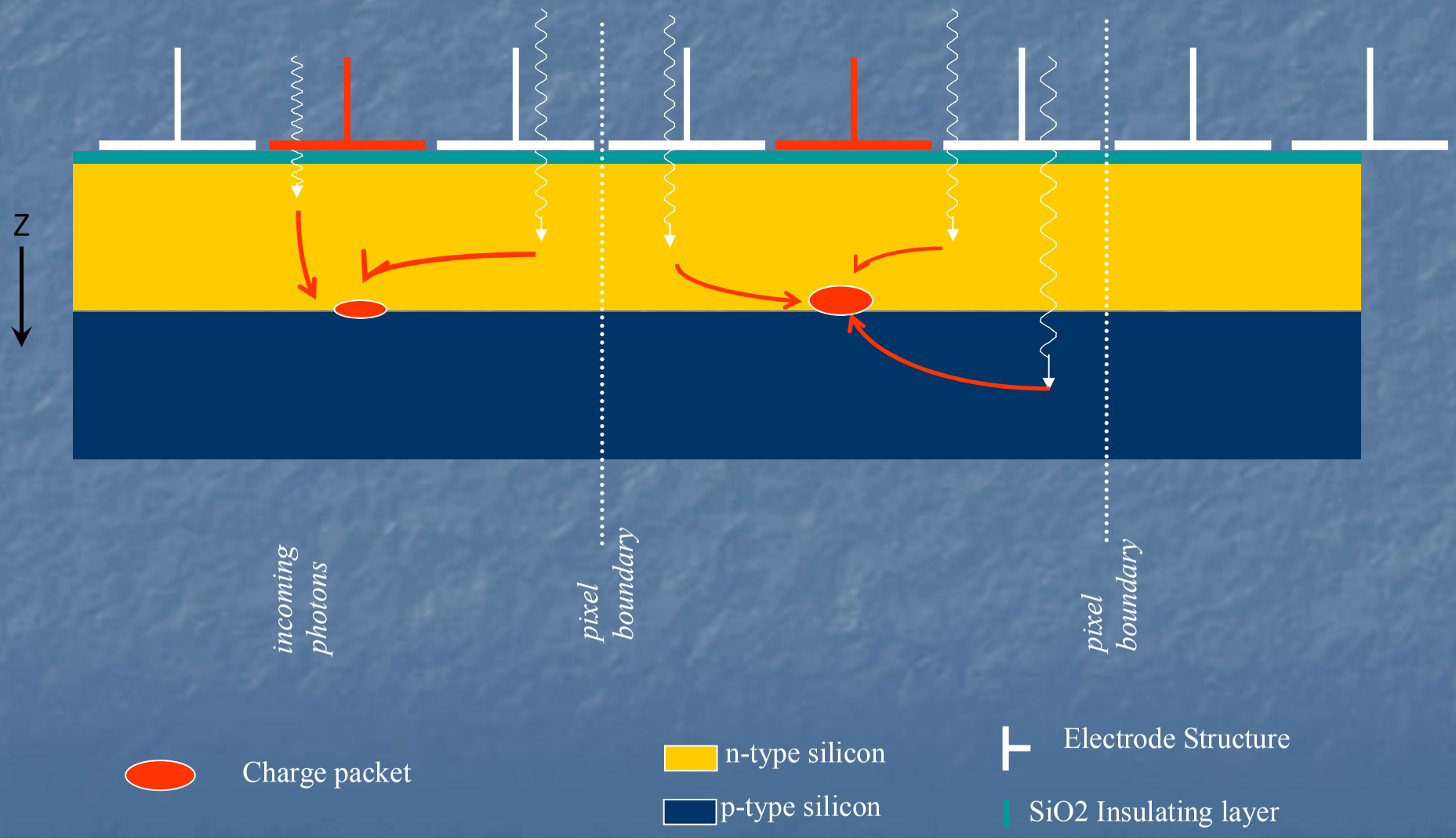
Qsat de 80 000 à 200 000 e- par pixels



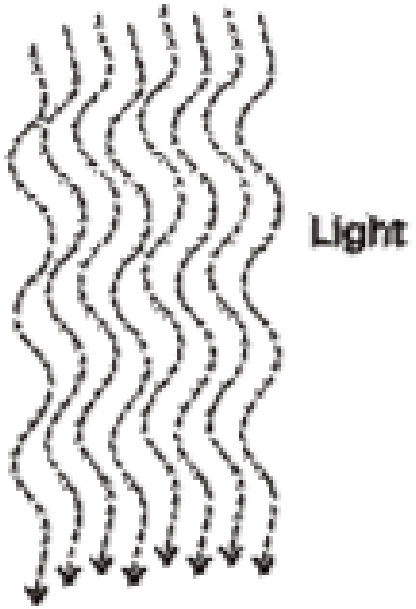
$$Q_{sati}(p) = \frac{p^2.\varepsilon_{ox}}{q.T_{ox}}(Vg - Vt)$$

Tox : Epaisseur oxyde
q : charge de l'électron
p : pas du pixel
Vg : Tension de grille appliquée
Vt : Tension de Seuil

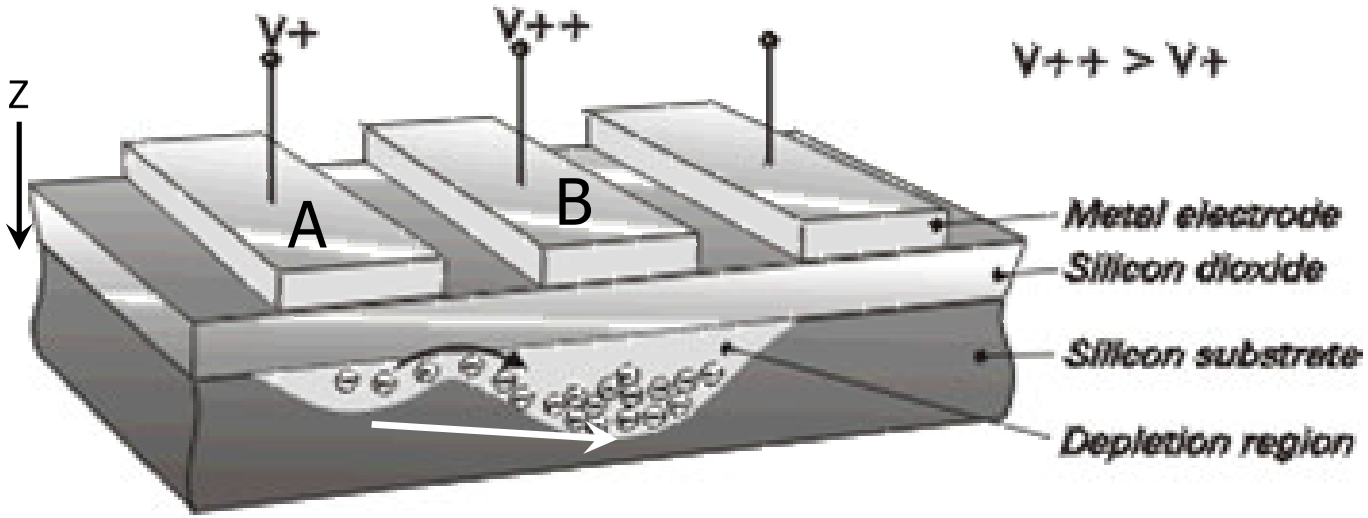
Collection des charges dans les pixels



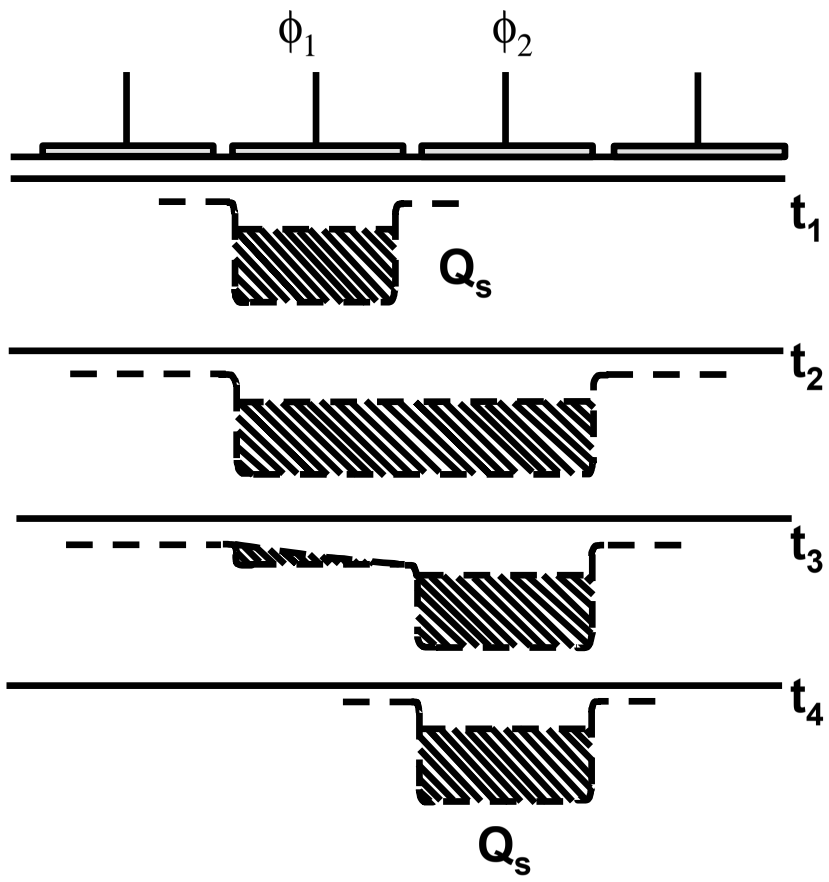
Principe de transfert

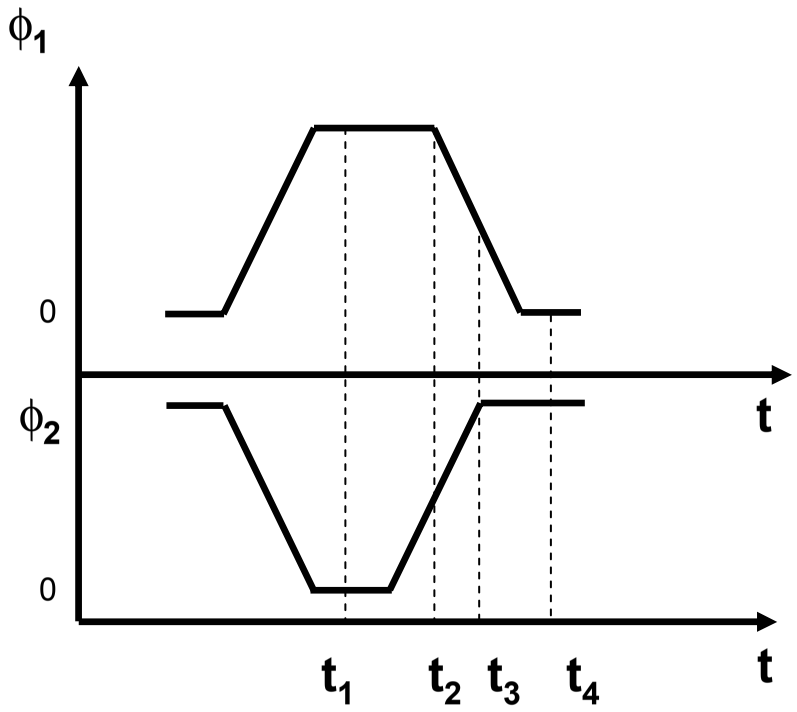


- Changement des phases
- Glissement des e- d'une électrode à une autre de A vers B
- Ne pas perdre les électrons en route
- Attention : 1 pixel = plusieurs électrodes



Principe de transfert

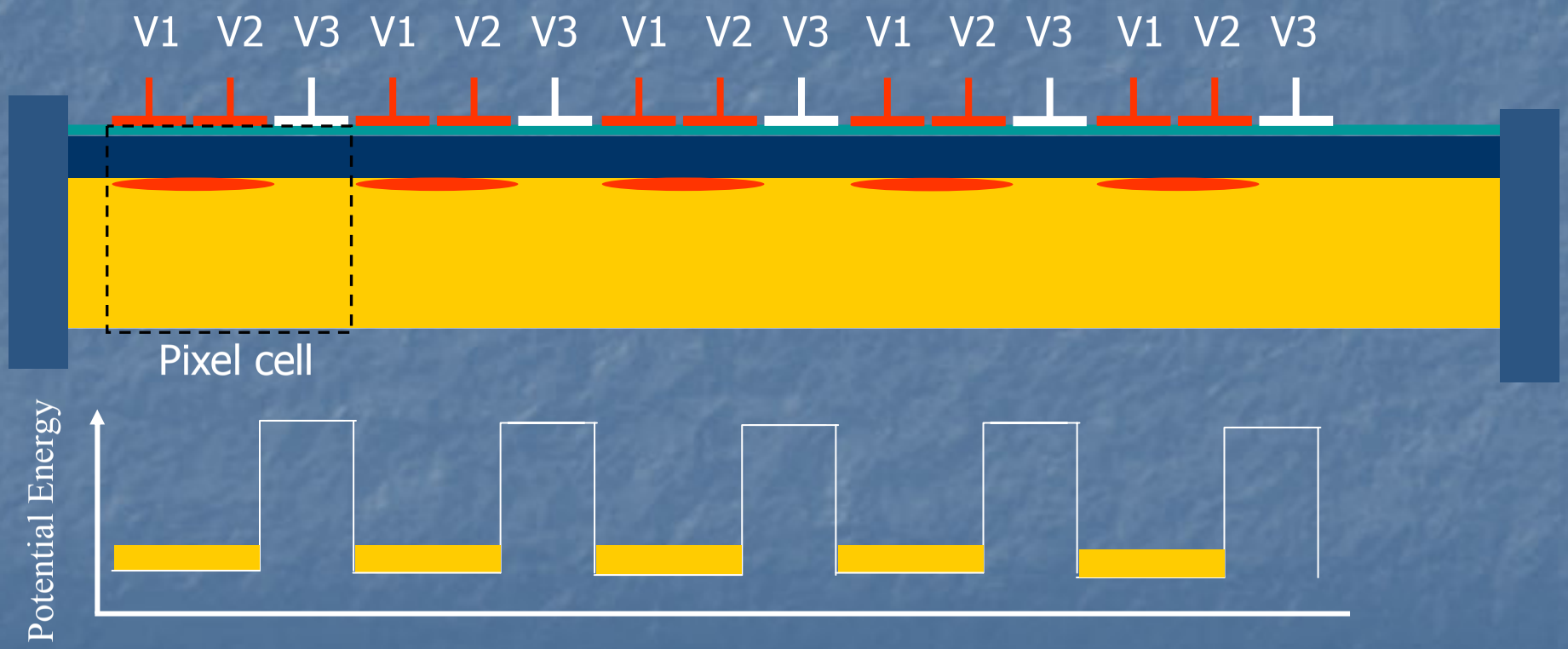




N électrodes par pixel = N phases de transfert

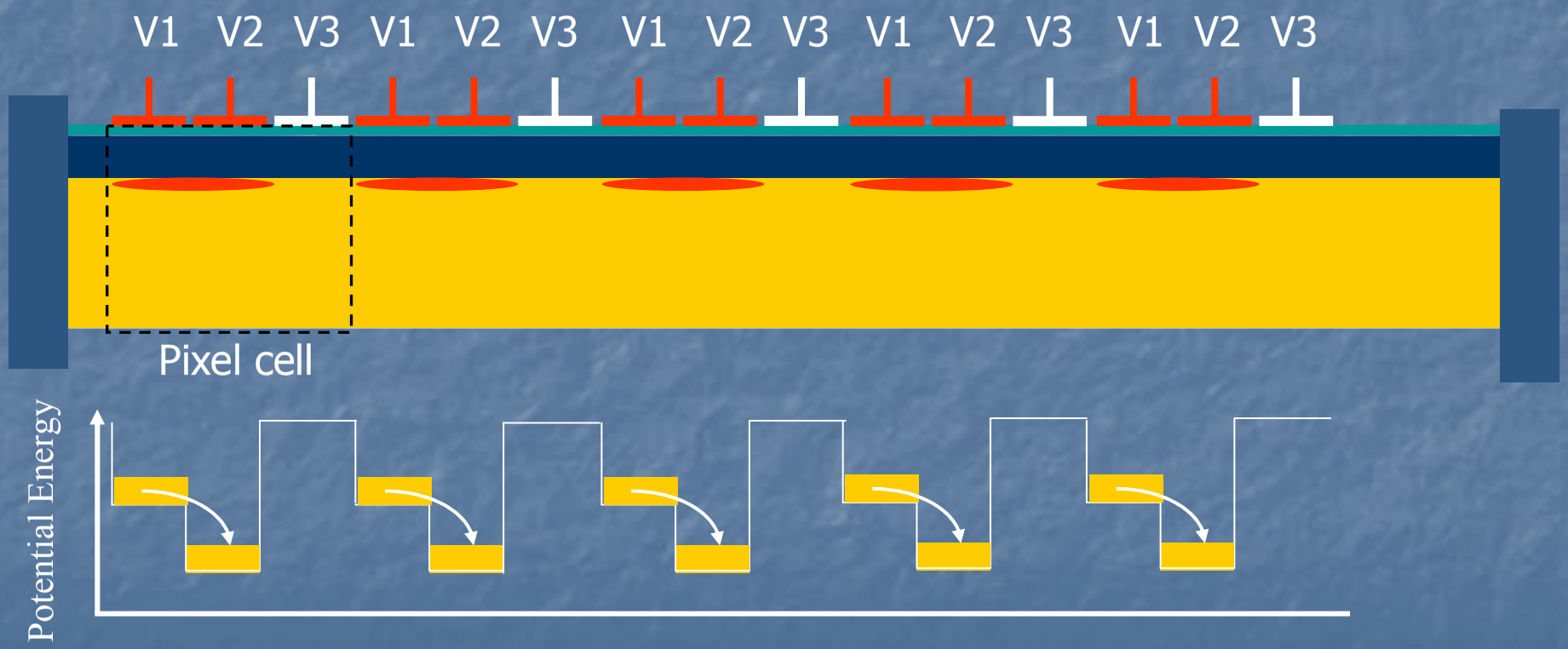
Conventional Clocking : phase 1

V1=V2=10v
V3=0v



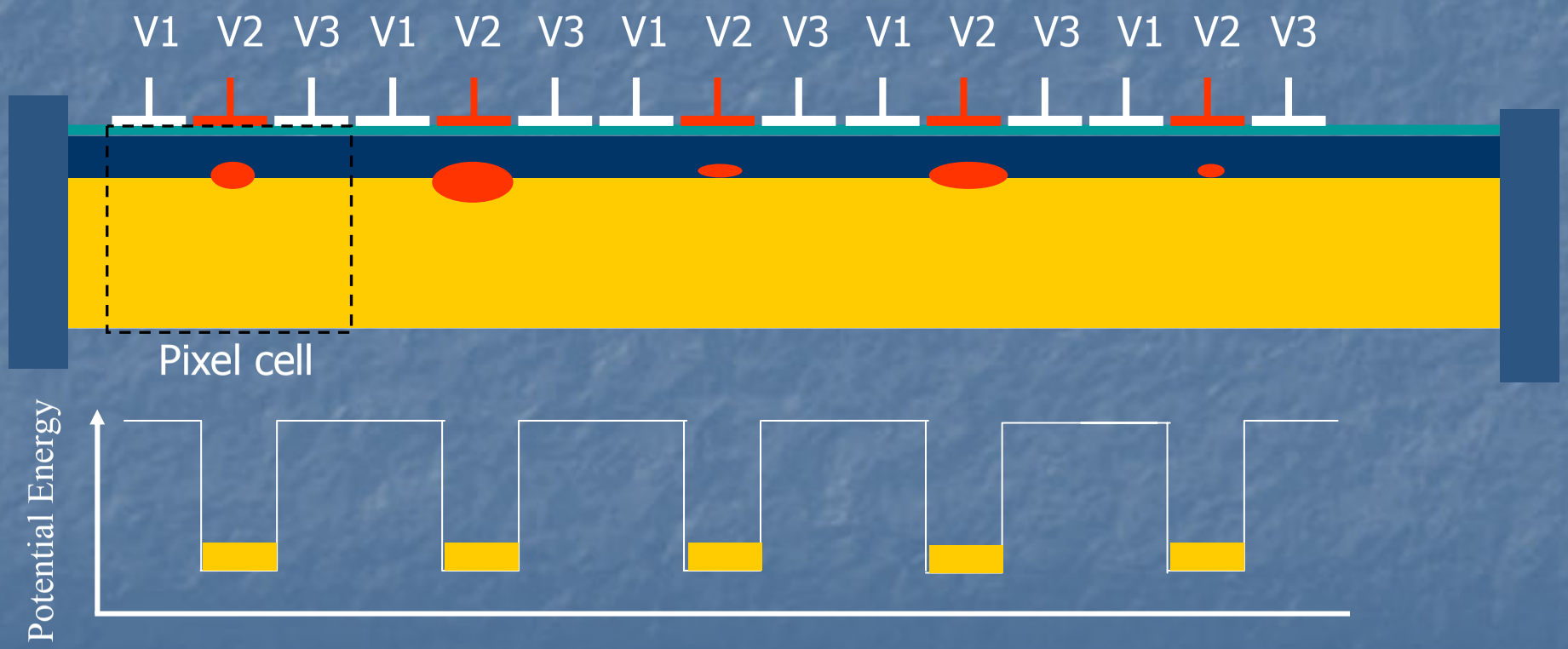
Conventional Clocking : phase 2

V1 -> 0v
V2=10v
V3=0v



Conventional Clocking : phase 3

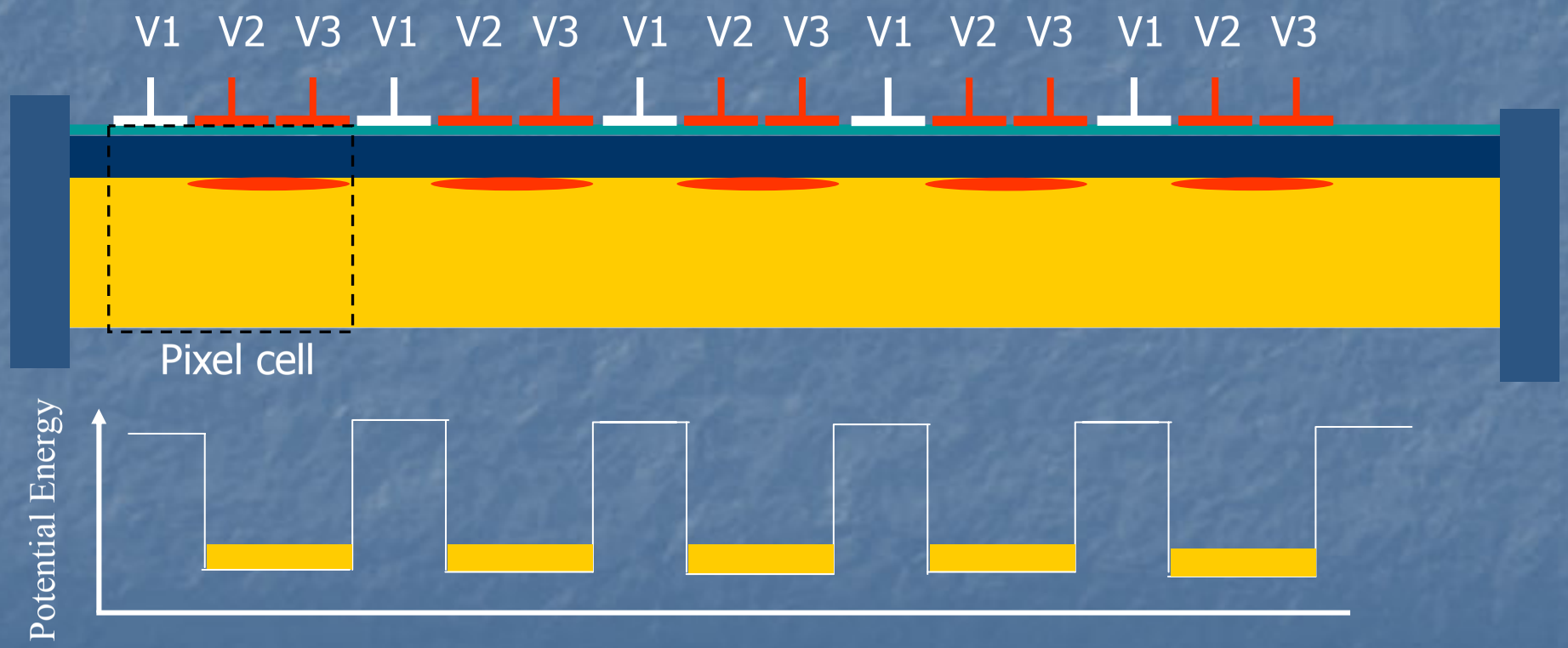
V1=0v
V2=10v
V3=0v



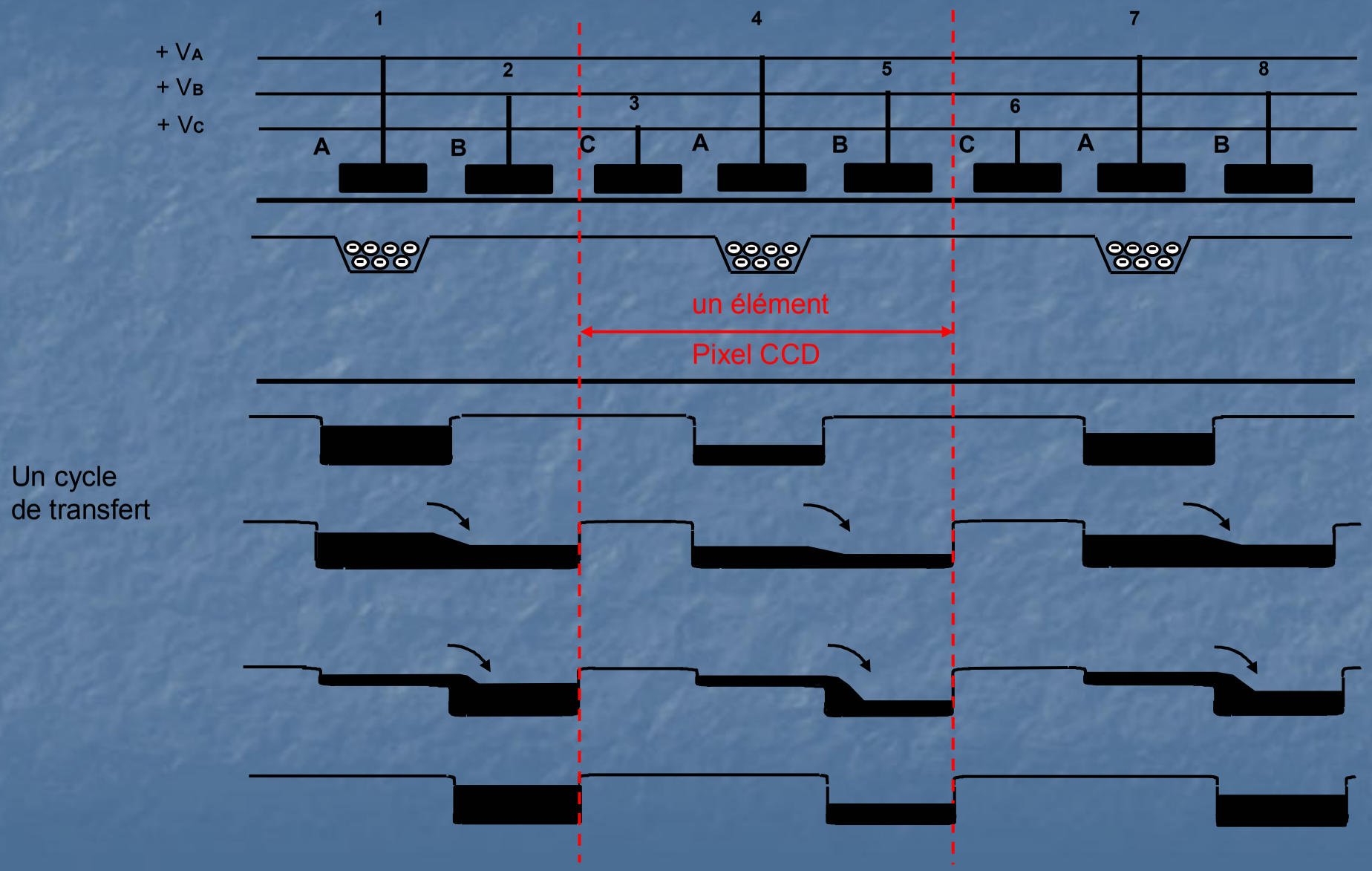
…… And so on …….

Conventional Clocking : phase 4

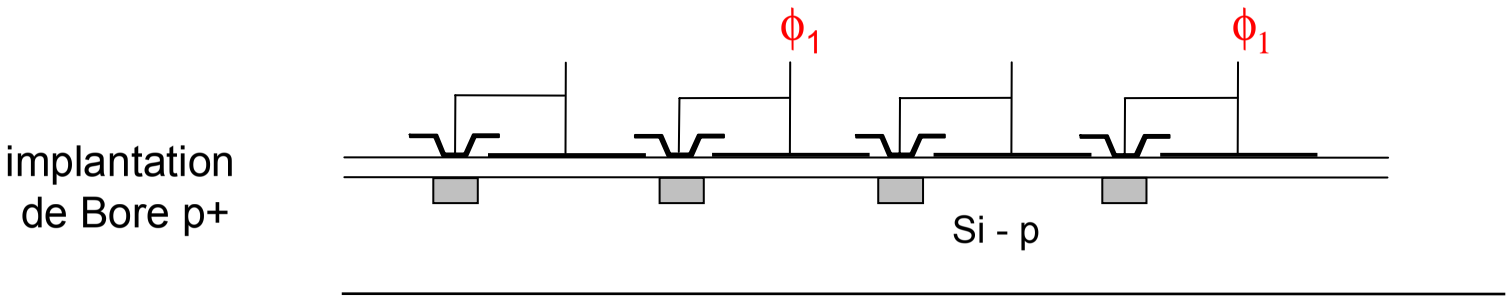
V1=0v
V2=10v
V3=10v



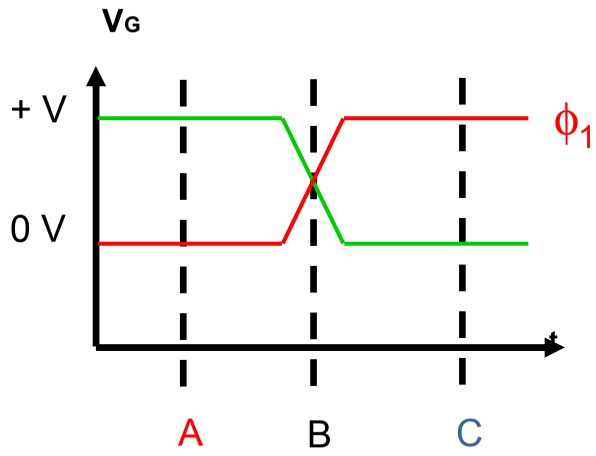
Transfert de charges : Dispositif à 3 phases

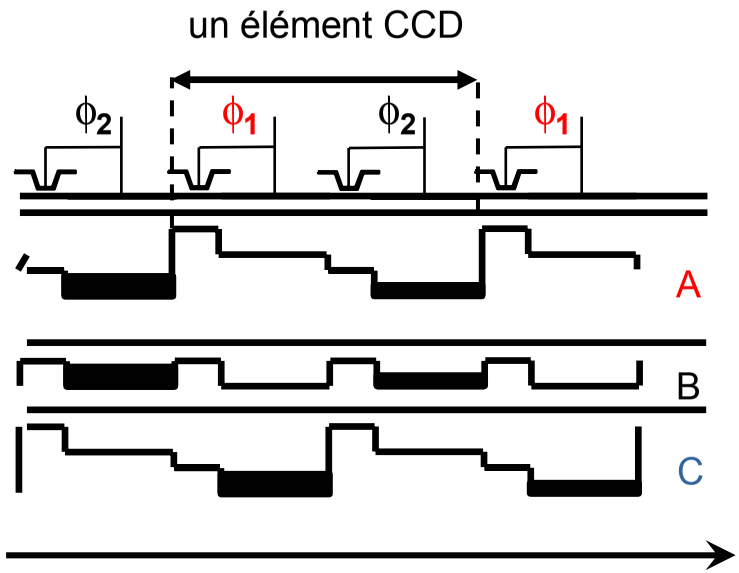


Principe de transfert à 2 phases/pixel



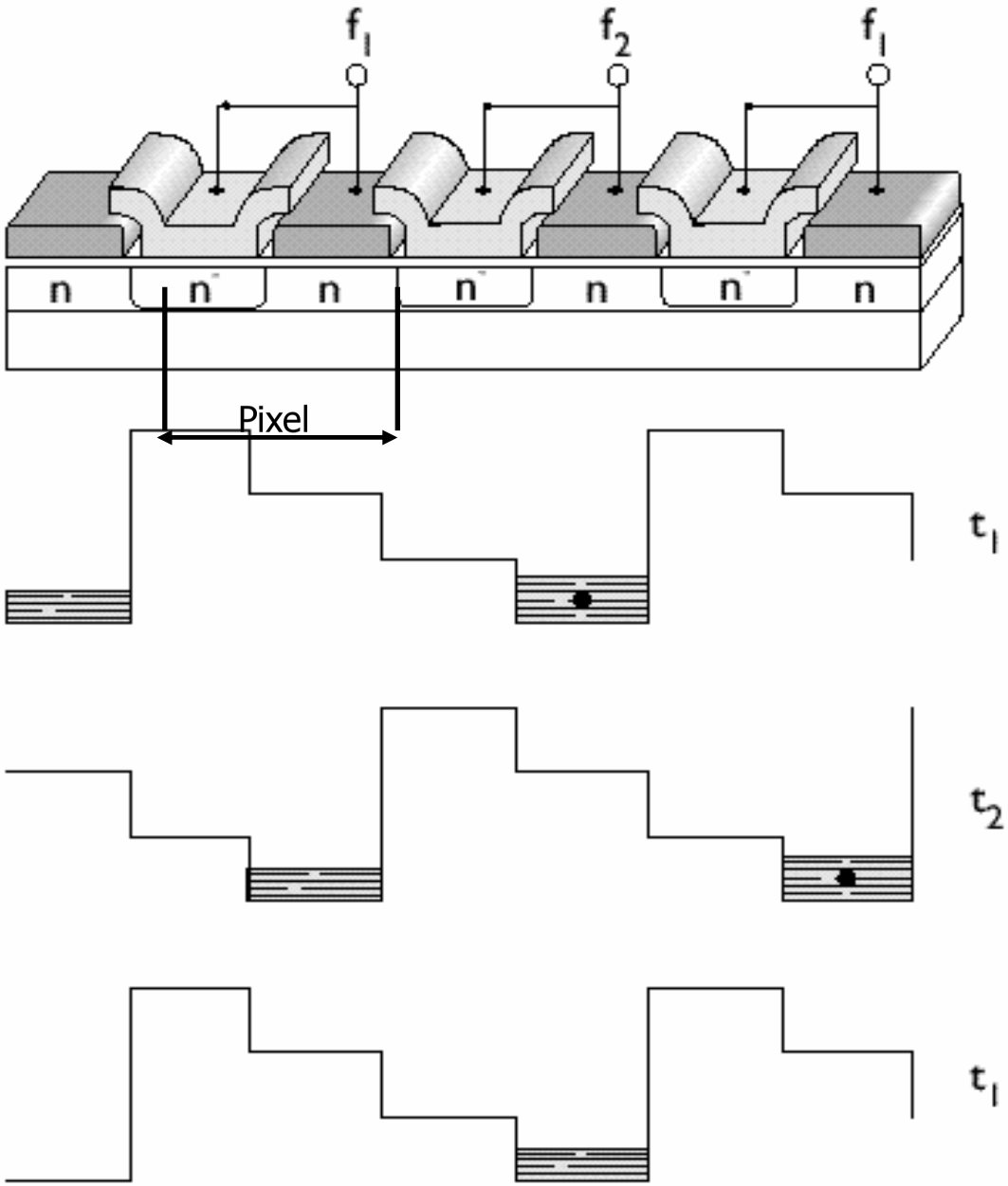
Croisement des phases « critique »



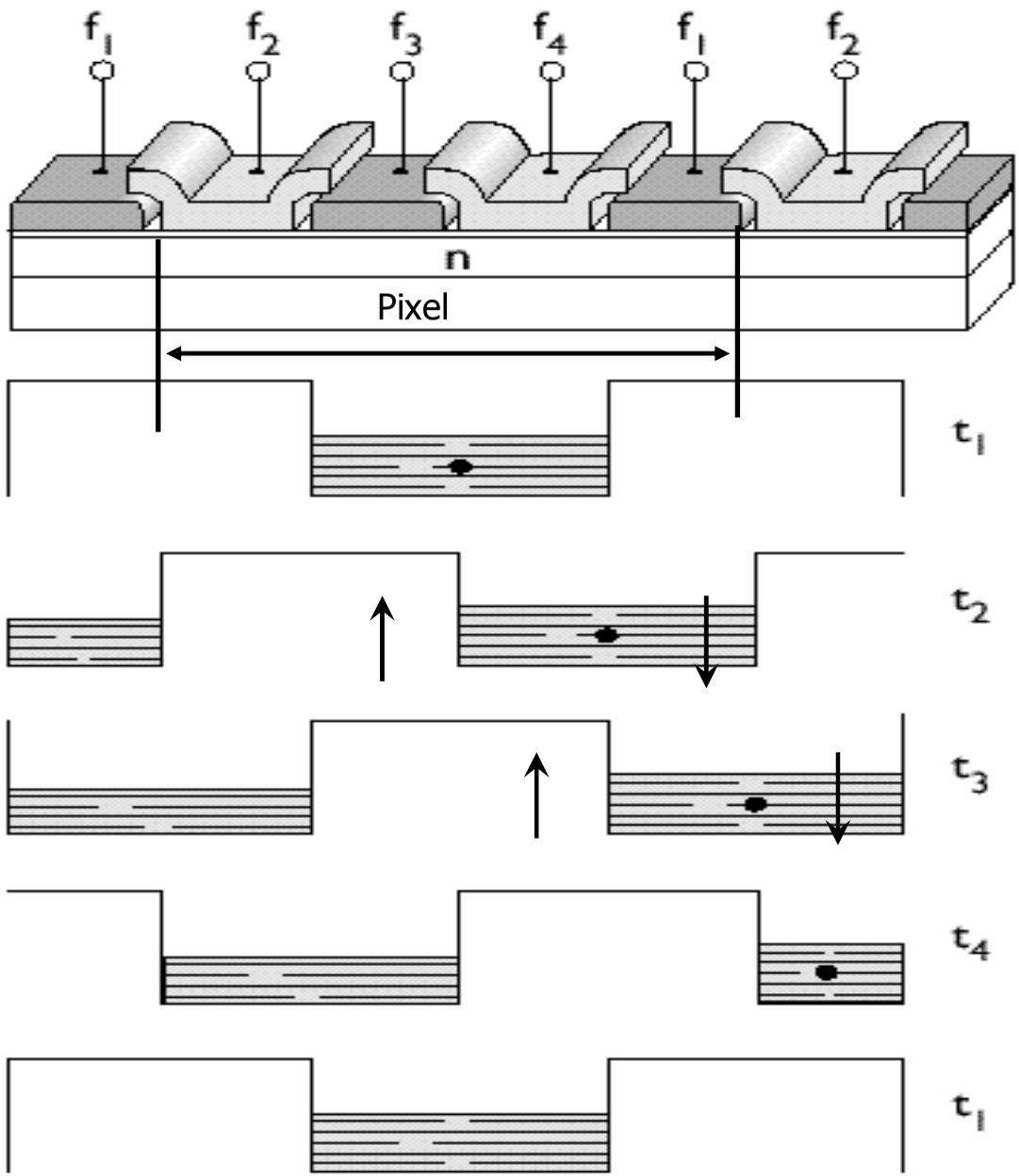


CCD Kodak utilisent ce type de transfert (sens de lecture unique)

Transfert à 2 phases/pixels



Transfert à 4 phases/pixels



Bi directionnel

Charges stockés sous deux phases/grilles

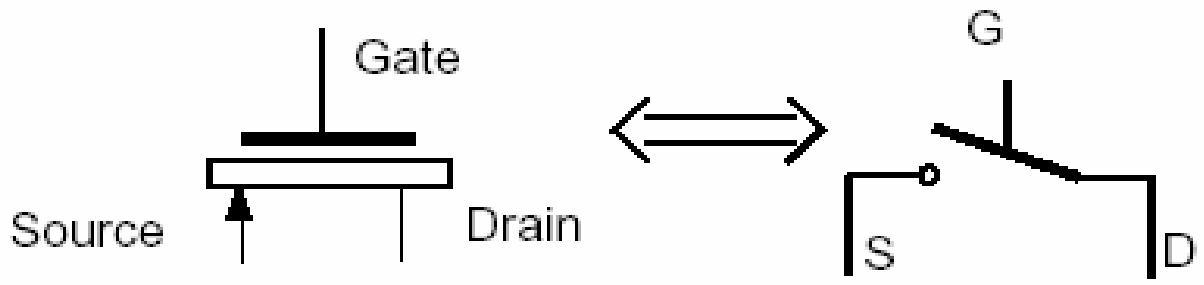
Nombre de phases du CCD ?

- Il peut être différent sur registres verticaux et horizontaux
- Critère de choix :
  - Capacité max. des pixels, Qmax
  - Efficacité de transfert, CTE
  - Bidirectionnalité
  - Vitesse de lecture, (pixels par seconde)
  - Taille du pixel (gros pixel > 20µm, 4 phases)
  - Complexité de pilotage des phases
    - Tensions
    - Croisement des phases
    - Nombre de pins du composant

Transistor MOS (Régime Switch)

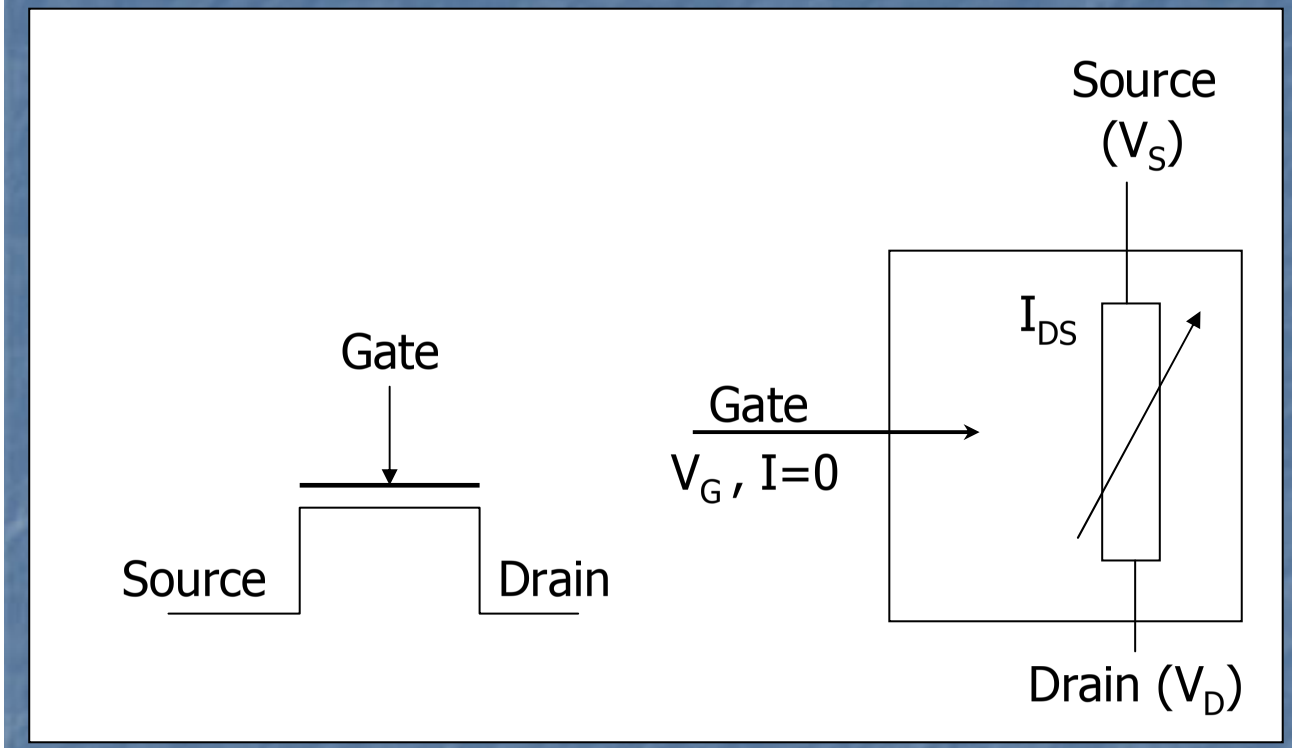
Brique élémentaire de l'électronique…

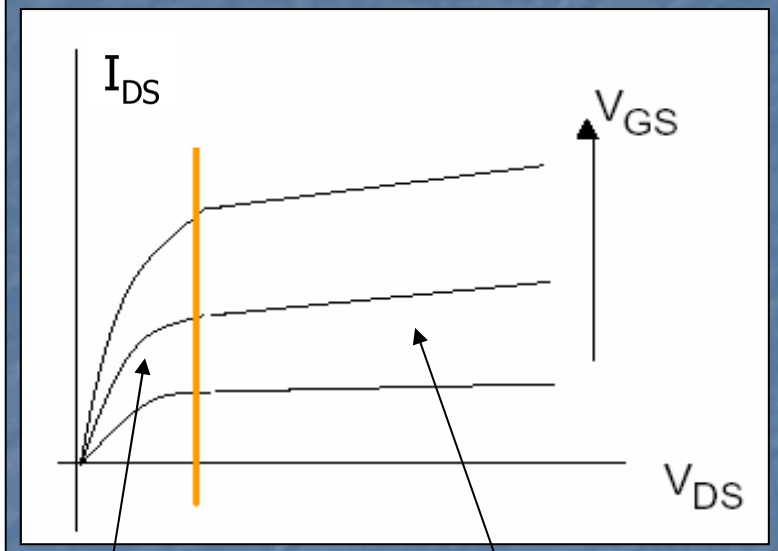
Le transistor MOS peut être assimilé à un interrupteur commandé en tension par sa grille, qui laisse passer un courant entre le drain et la source comme le montre la figure 32 ci-dessous :



- Imperfection par rapport à un switch :
  - résistance non nulle en mode « ON » Vgate = 5v
  - résistance non infinie en mode « OFF » Vgate = 0v
  - Injection de charges par G possible (!)
  - Tension de seuil Vgs= 0.7v

Transistor MOS (régime buffer)
Brique élémentaire de l'électronique…





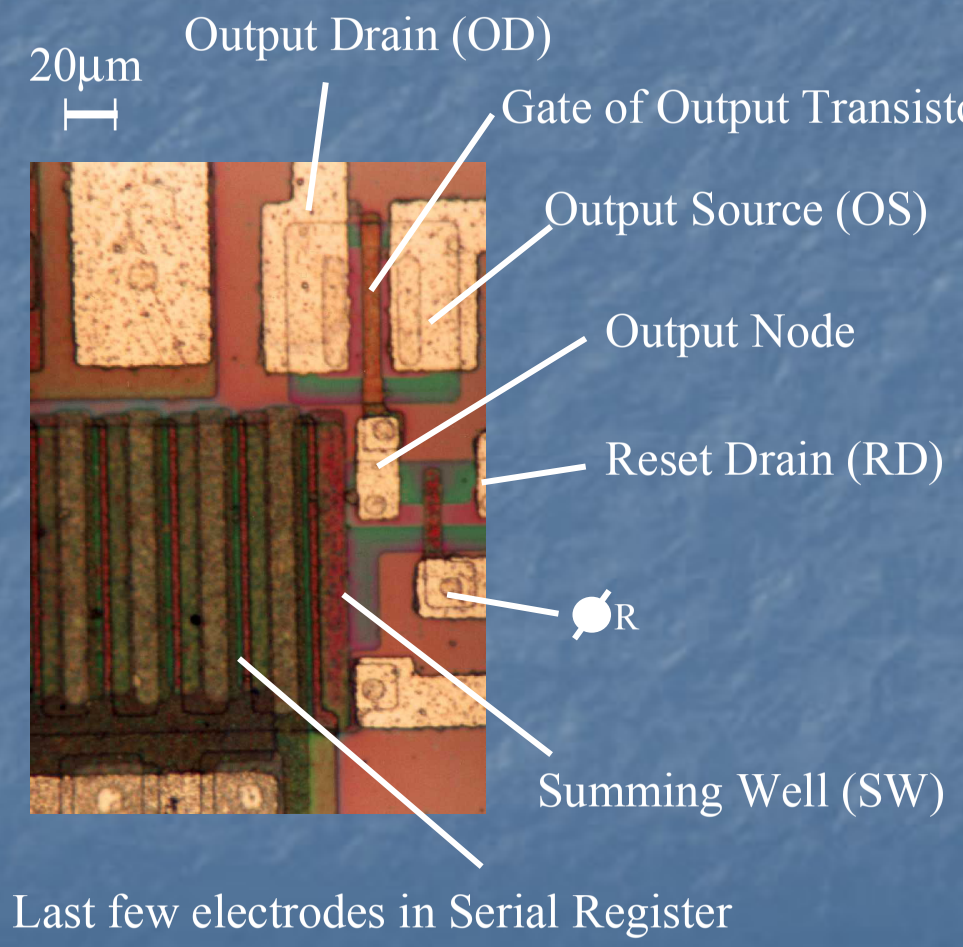
1/R : régime ohmique variable

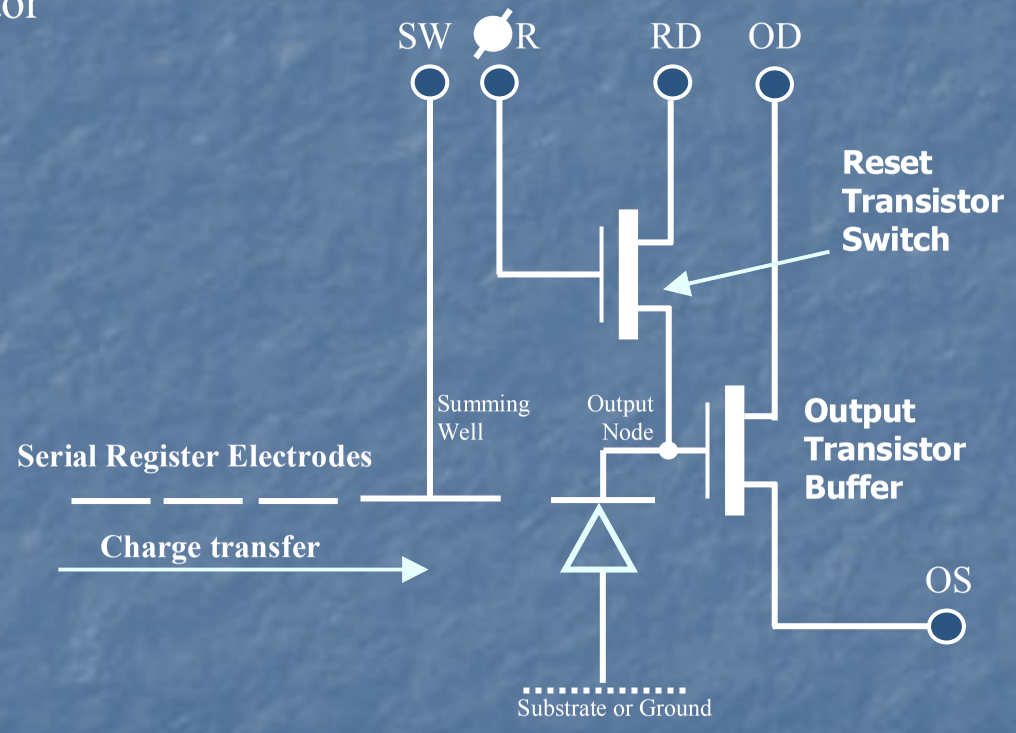
régime Switch

- Utilisé en suiveur dans les capteurs d'images
  - <u>Pas de courant</u> sur la Gate
  - Gain de 0.8 entre Vin (VG) et Vout (VD)
  - Impédance forte sur VG, impédance faible sur le VD : transformation d'impédance : buffer

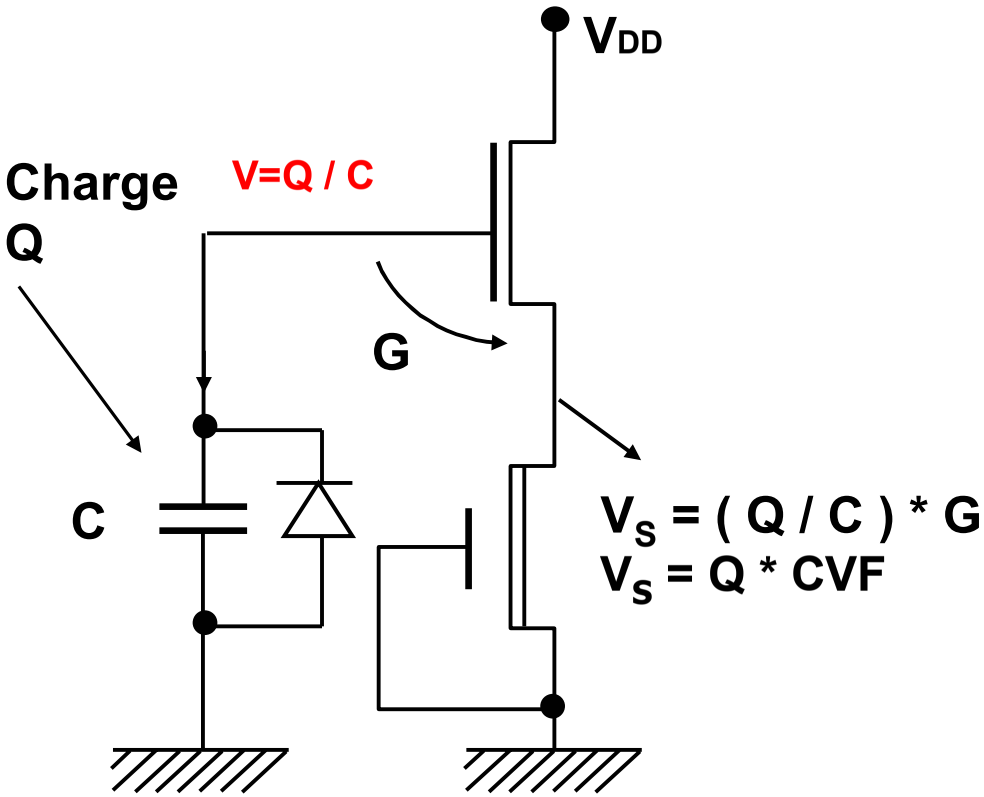
Ampli de sortie

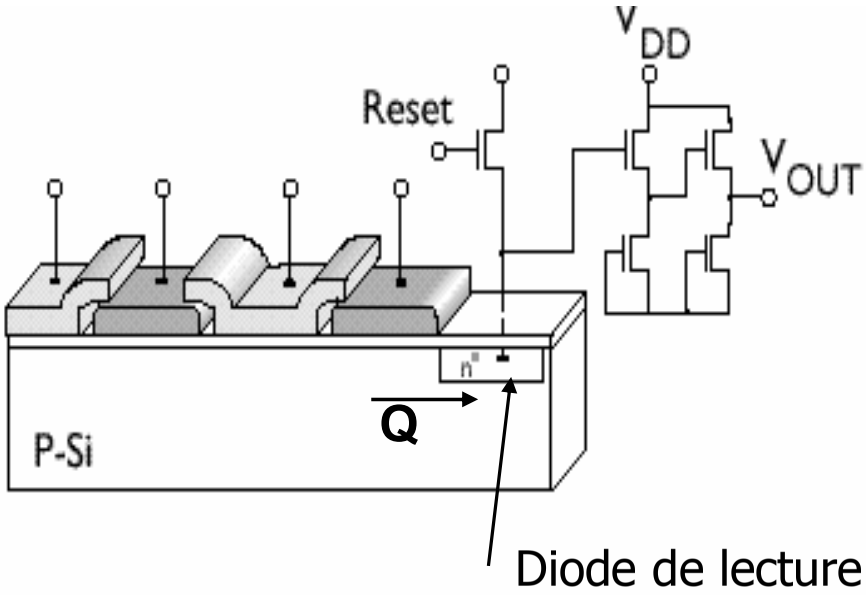
Photomicrograph of the on-chip amplifier of a Tektronix CCD and its circuit diagram.





Facteur de conversion : sortie analogique





C : capacité de lecture (fF)
G : gain de l'amplificateur de sortie < 1
La charge Q est transférée dans une diode de lecture, de capacité parasite C

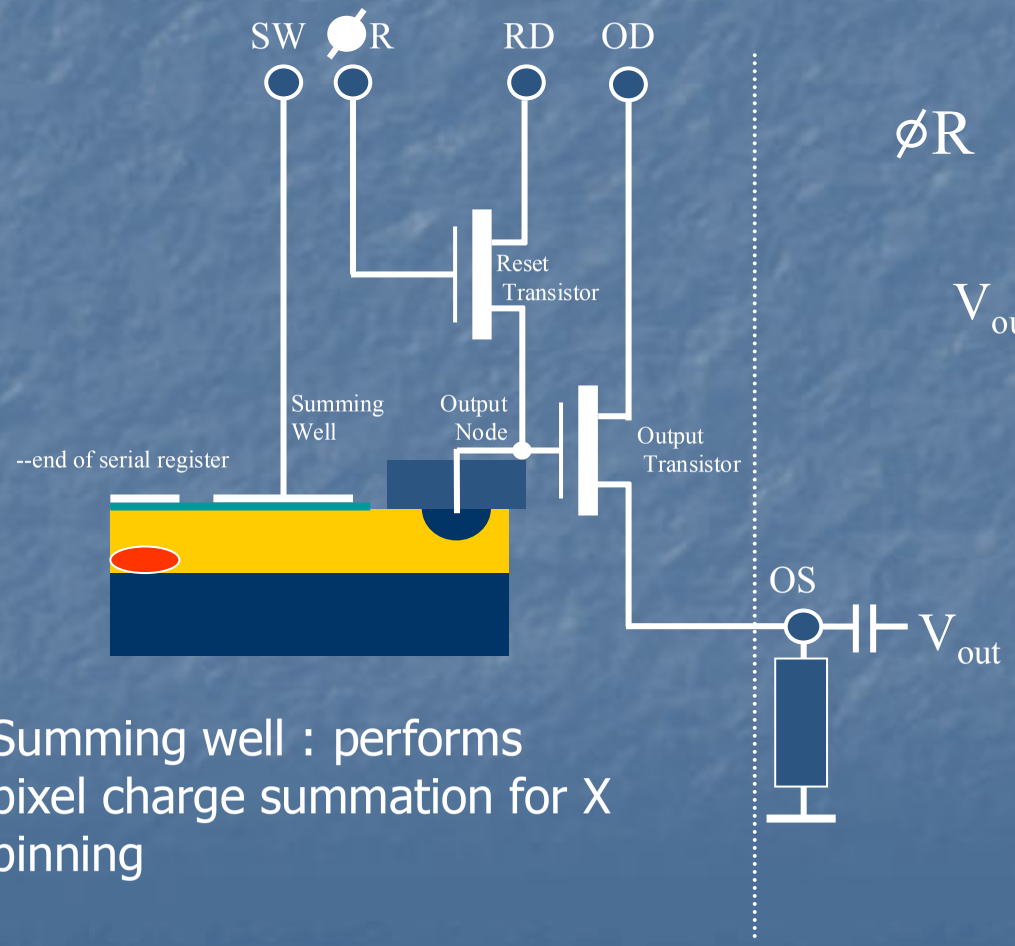
CVF : facteur de conversion (µV/e-)

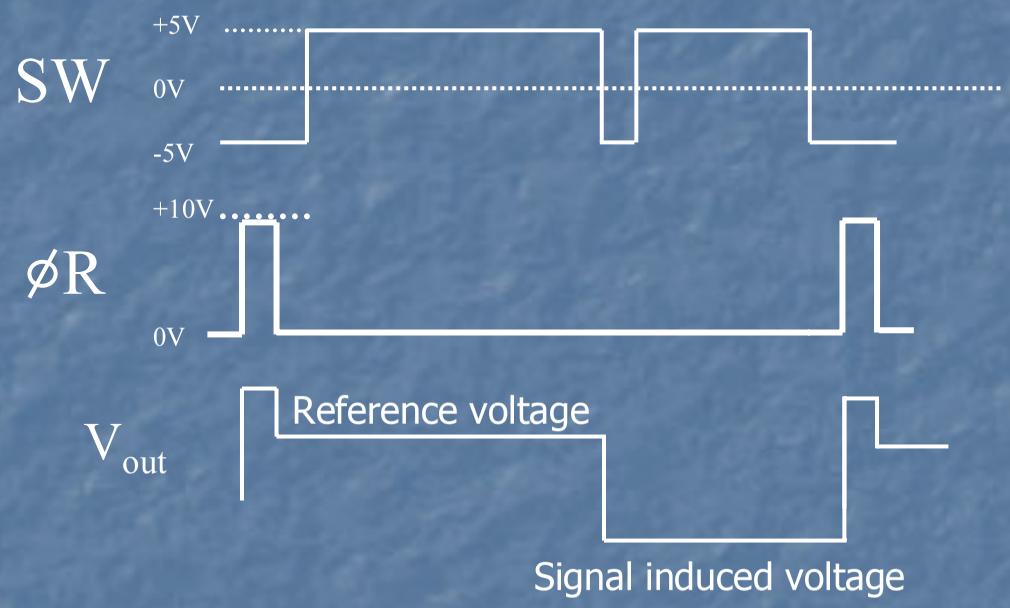
Valeurs typiques de 1µV/e- à 30 µV/e-, Vs= 1 à 0.5 V
Charge Qmax = 80 000 et 200 000 e-, défini un Vs_{max}

Ampli de sortie

The on-chip amplifier measures each charge packet as it pops out the end of the serial register.

RD and OD are held at constant voltages





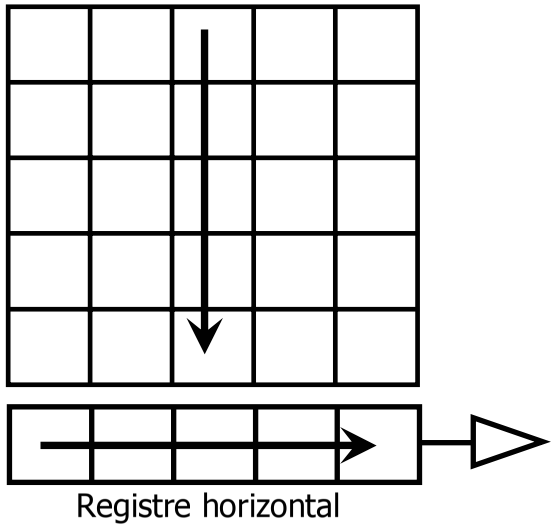
(The graphs above show the signal waveforms)

The measurement process begins with a reset of the 'reset node'. This removes the charge remaining from the previous pixel. The reset node is in fact a tiny capacitance (< 0.1pF)

Summing well : performs pixel charge summation for X binning

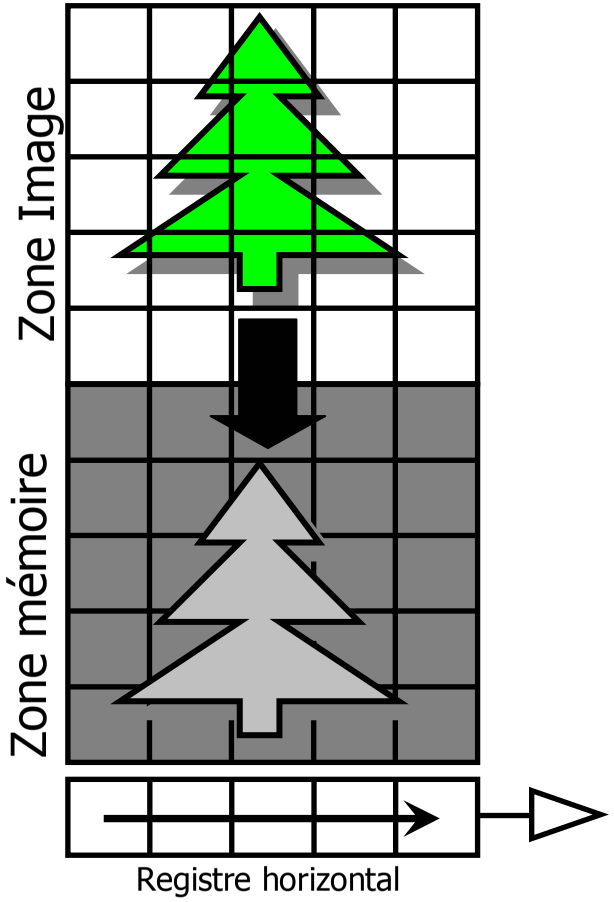
3 Architectures de CCD de NxM pixels

Pleine trame

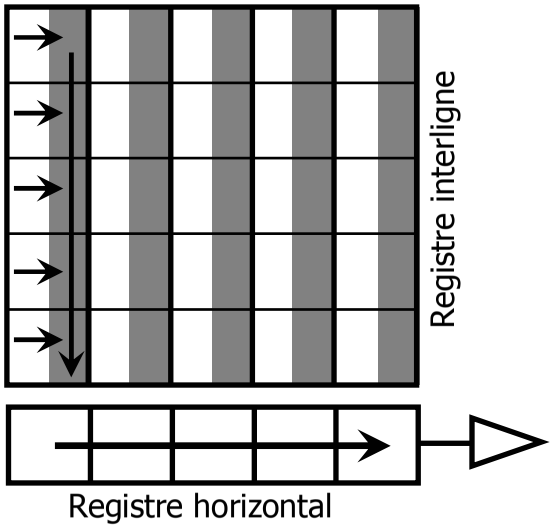


Obturateur obligatoire

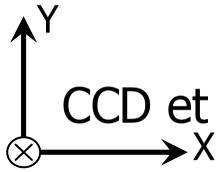
Transfert de trame



Transfert Interligne



Pas d'obturateur
Sensibilité réduite



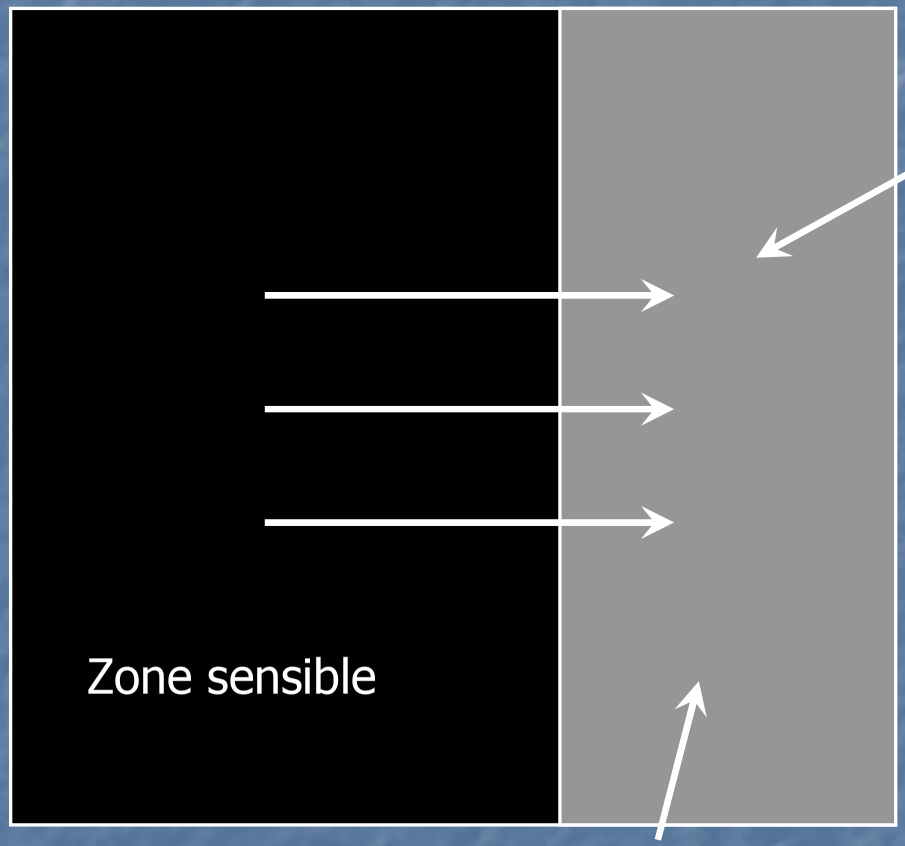
CCD et Binning : combiner plusieurs pixels en un seul super pixel par sommation dans le registre horizontal et la diode de lecture

Séquencement de lecture des diverses architectures de CCD

- Full frame (pleine trame)
  - A> Transfert des charges de la ligne complète vers le registre horizontal (RH)
  - B> Décalage dans le RH vers l'ampli de sortie, N fois
  - La séquence A-B est répétée M fois
- Transfert de trame
  - Transfert de la matrice NxM de la zone image vers la zone mémoire
  - L'intégration peut re-commencer dans la zone image
  - A> Transfert de la ligne complète de la zone mémoire vers le registre horizontal (RH)
  - B> Décalage dans le RH vers l'ampli de sortie, N fois
  - La séquence A-B est répétée M fois
- Transfert interligne
  - Transfert de charge de tout les pixels de la colonne vers le registre vertical interligne
  - L'intégration peut re-commencer dans les pixels
  - A> Transfert de la ligne complète vers le registre horizontal
  - B> Décalage dans le RH vers l'ampli de sortie, N fois
  - La séquence A-B est répétée M fois

Facteur de remplissage (CCD interligne)

Pixel , ex 15x15 µm

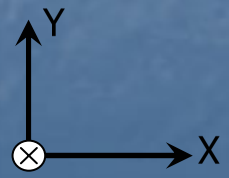


Masque anti-lumière

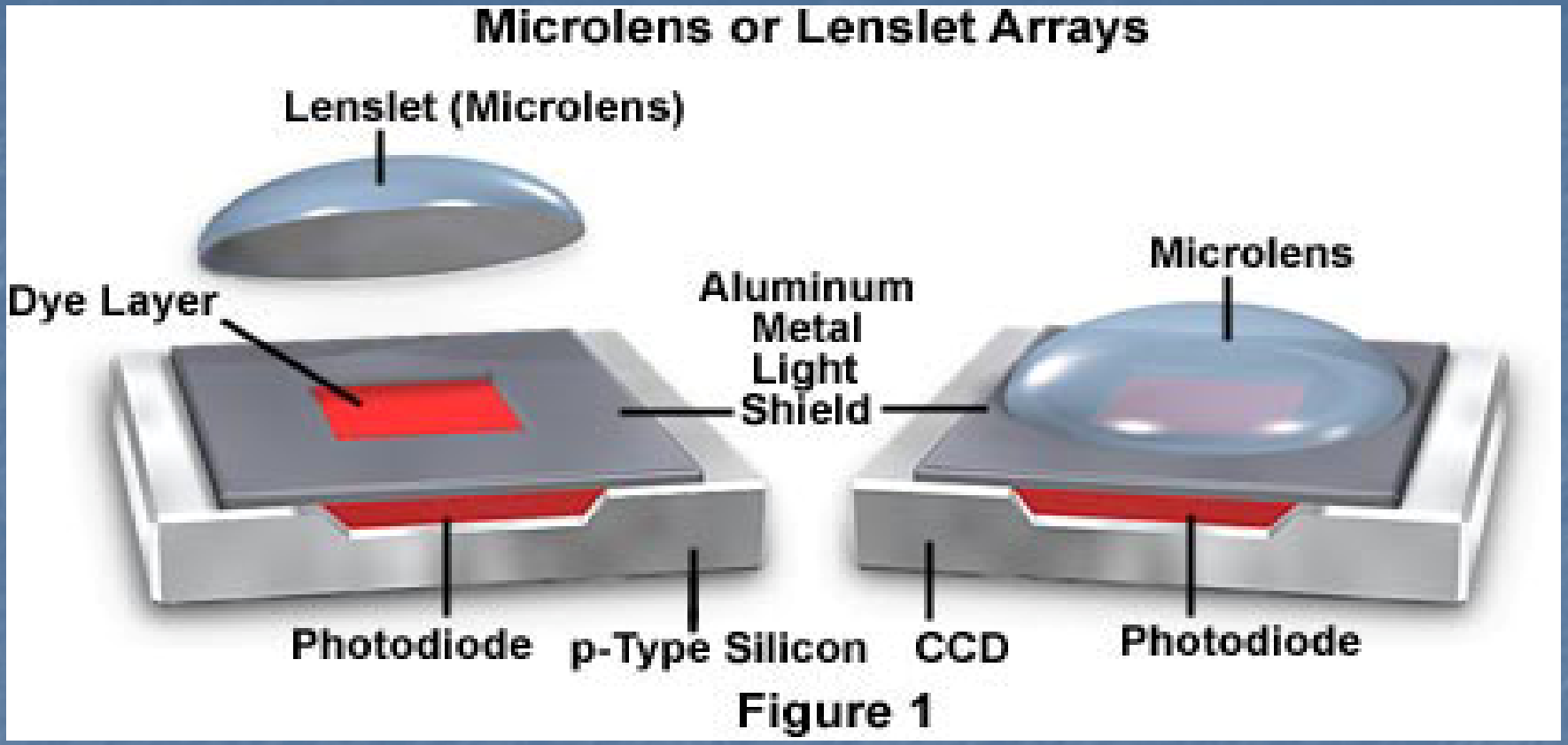
Facteur de remplissage
Ou « Fill Factor »

-De 100% à 25%
- des microlentilles peuvent aider

Zone de stockage à l'intérieur du pixel, non sensible



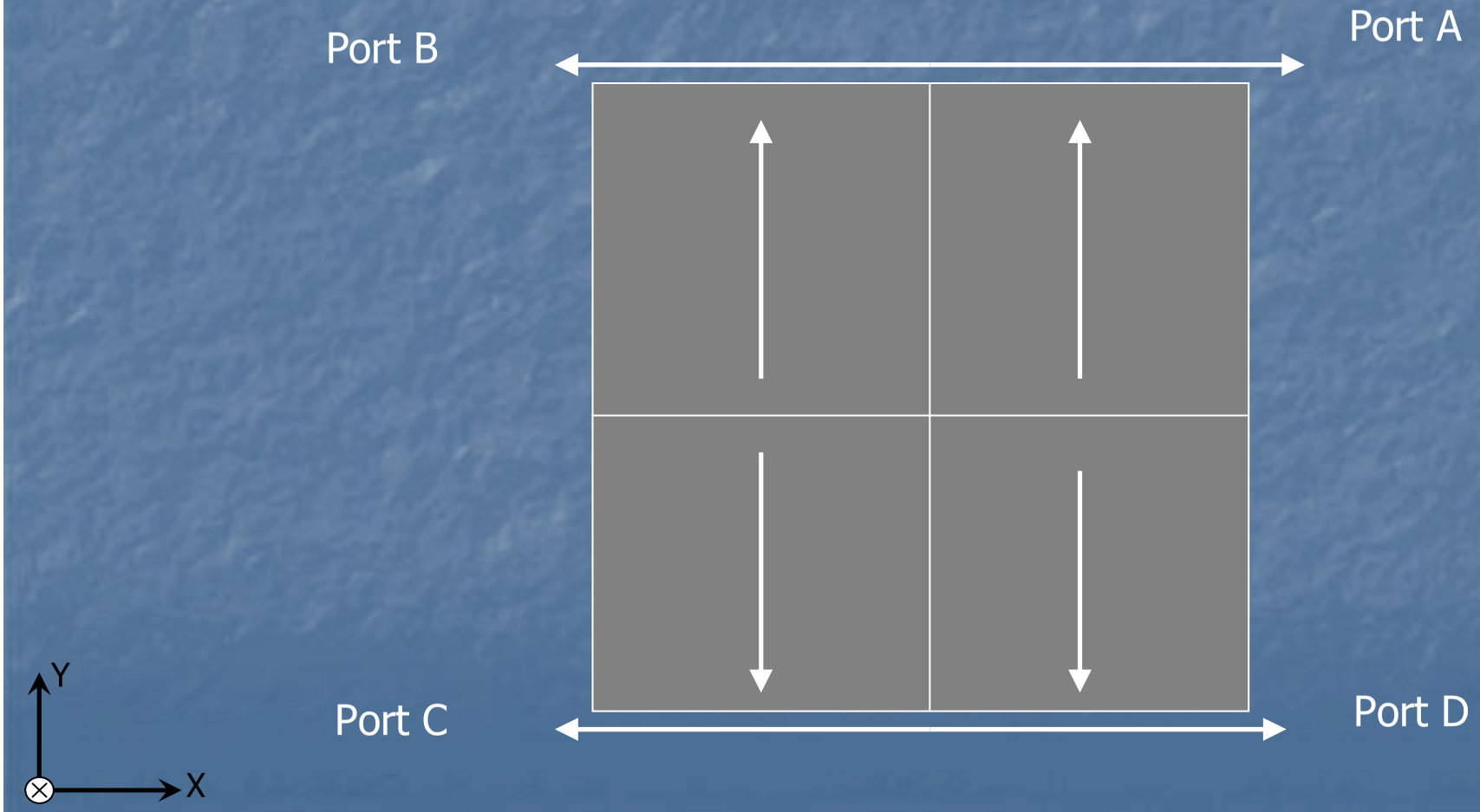
CCD, microlentilles



- Adapté pour une gamme d'ouverture optique numérique et angles d'incidence
- Attention : cela s'optimise ! Code V ou Zemax ….

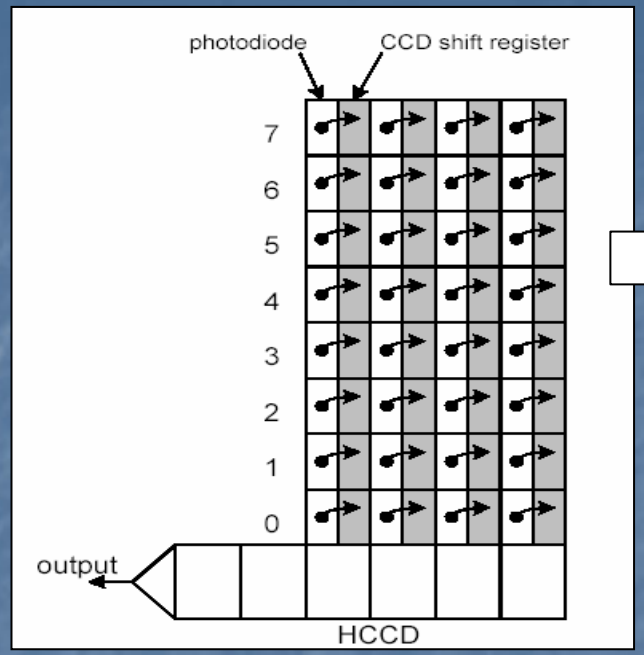
Lecture des grands CCD

- 4 millions de pixels en 1s = 2 MegaPixel/s
  - ⇨ Plusieurs ports de sortie
  - ⇨ Possibilité de lire le CCD sur 4 cotés

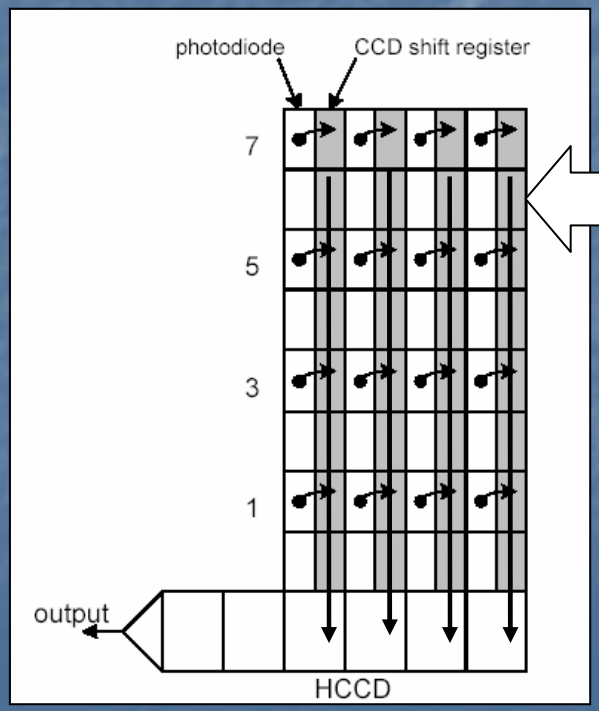


Lecture progressive scan - mode entrelacé

- Architecture CCD doit le permettre
- Compatible avec les écrans tube à affichage entrelacés
- En désuétude…



Progressive scan
Lecture lignes
0,1,2…
=
une image

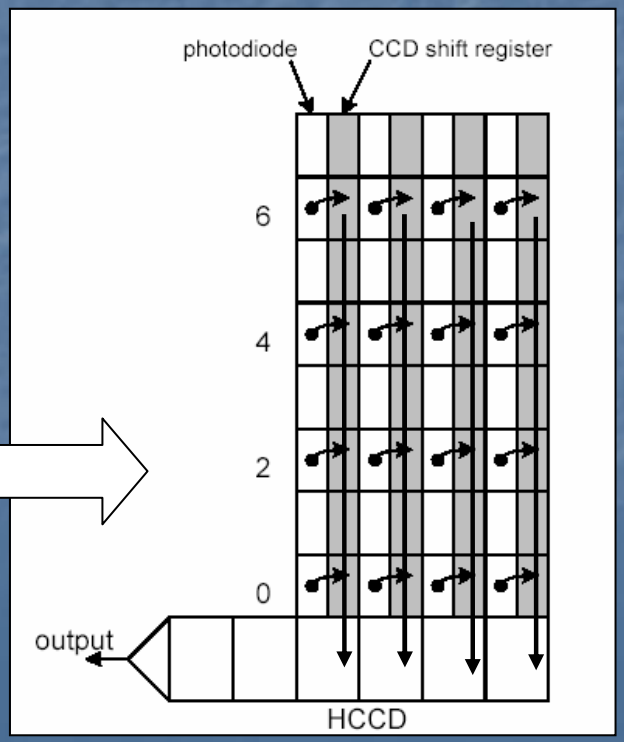


Mode entrelacé :

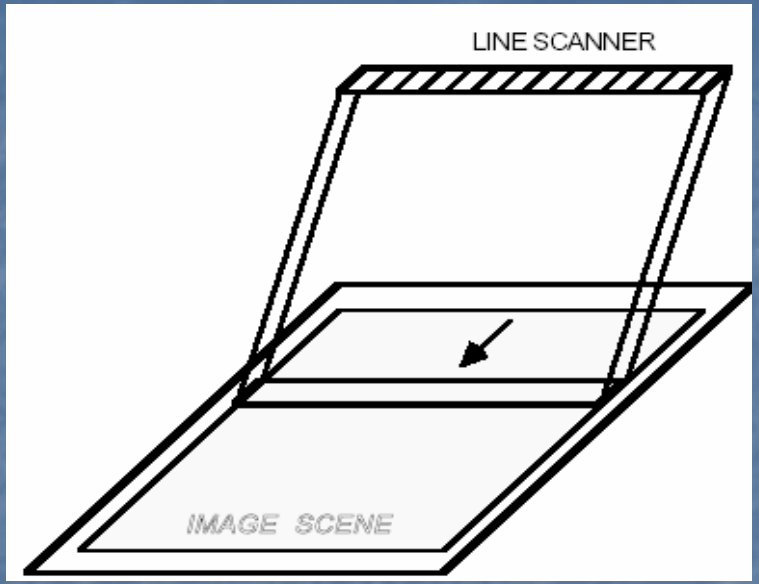
Lecture lignes impaires
1,3,5…

Lecture lignes paires 0,2,4…

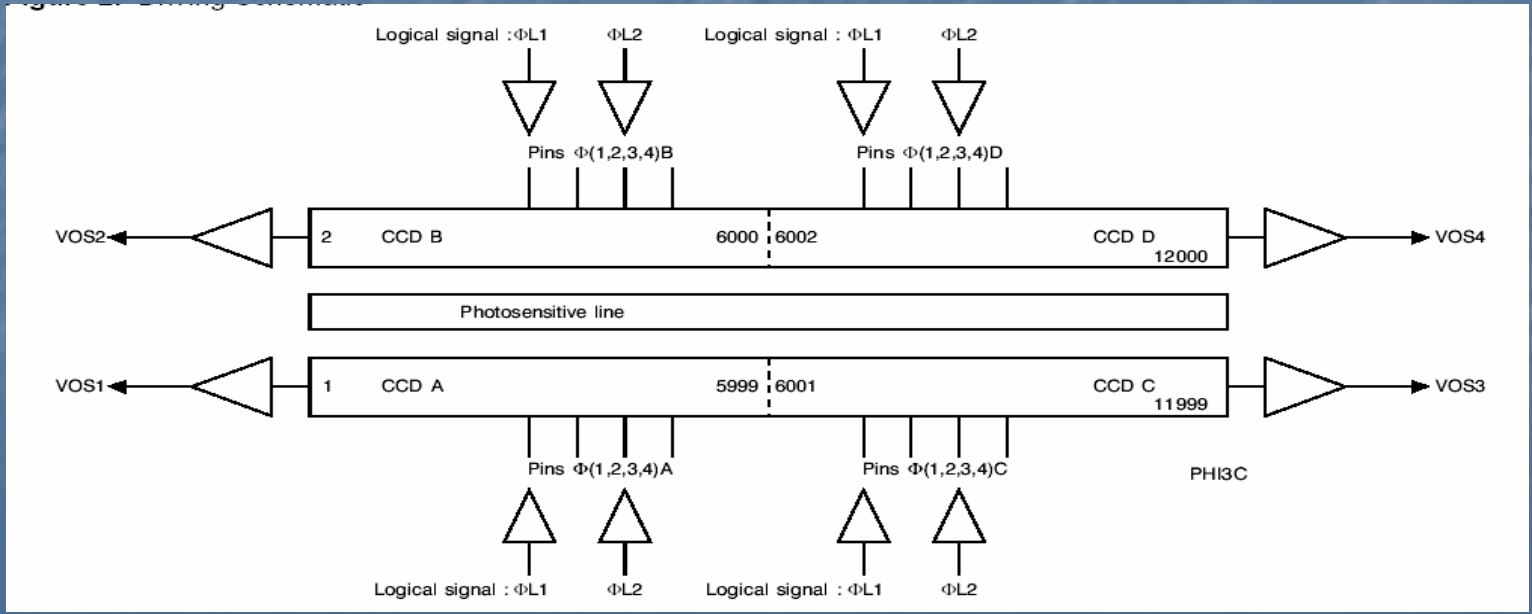
=
deux images



Barrettes de CCD



- Matrices de 1xN, N=12000
- Lecture rapide
- Application type balayage ou scan
  - Scanner papier et négatifs
  - Photocopieuses
  - Spatial (obs de la terre teledetection)
  - Spectroscopie 1D
  - Contrôle non destructif
- Peu coûteux, facile a mettre en œuvre
- nécessite bcp de photons
- optique de balayage (parfois un moins)

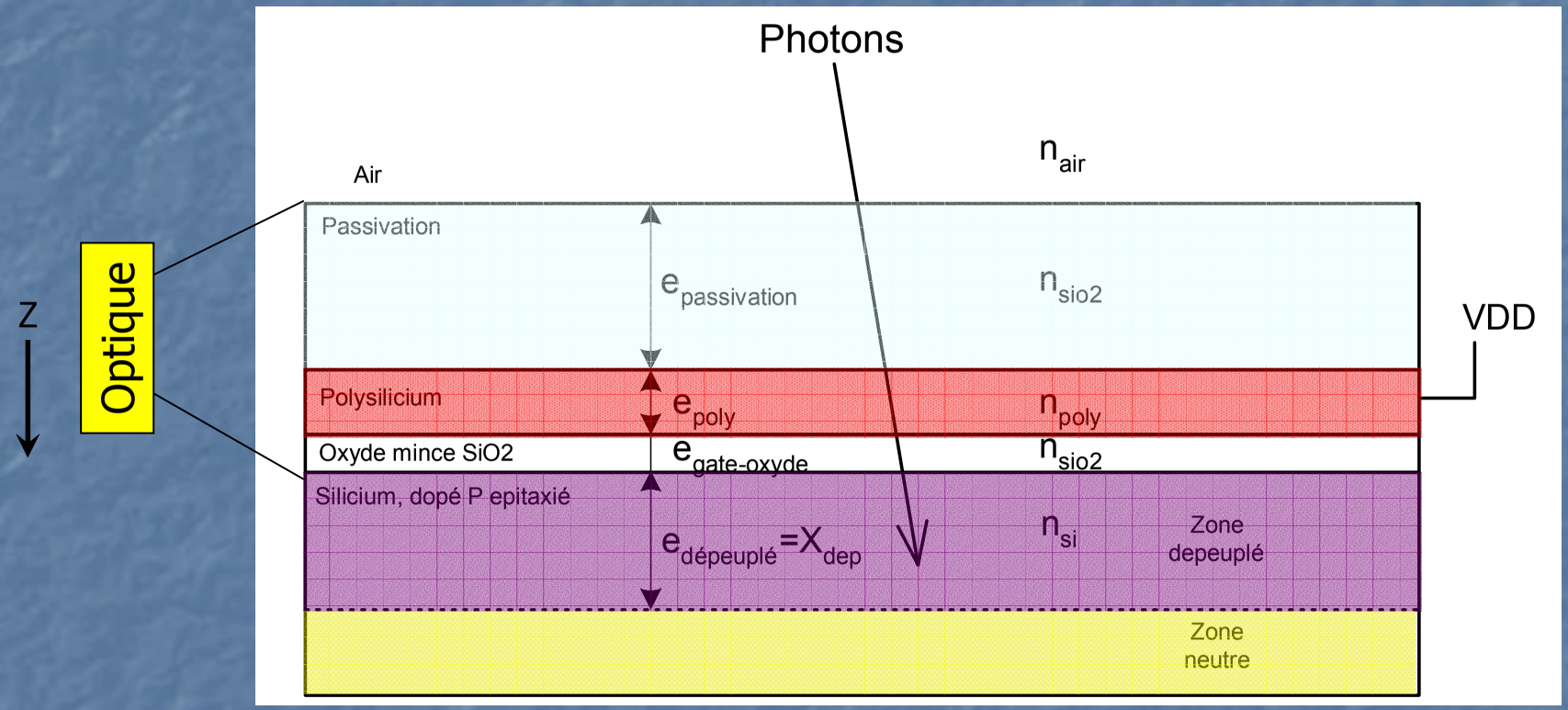


Mérites comparés des architectures CCD

CCD Full Frame	**CCD Transfert interligne/CCD Transfert de trame**
Sensibilité élevée	Sensibilité élevée avec µ-lentilles
Dynamique élevée	En retrait
Faible bruit	En retrait
Grande taille surf. sensible	En retrait (doublé si transfert de trame)
Cadence vidéo possible	Cadence image élevée avec obtur. Élec
Besoin d 'obturat°. mécanique	Pas de besoin d 'obturat°. mécanique
Il arrive aussi d'avoir des µL	µ-lentilles peut causer aberrations µ-lentilles nécessite faible ouverture
Rare	Chipset pour la lecture
Cher	Moins cher
Domaine d'application Scientifique, au haut de gamme	Applications « Large public » , sensibilité non déterminante

Calcul théorique du rendement quantique

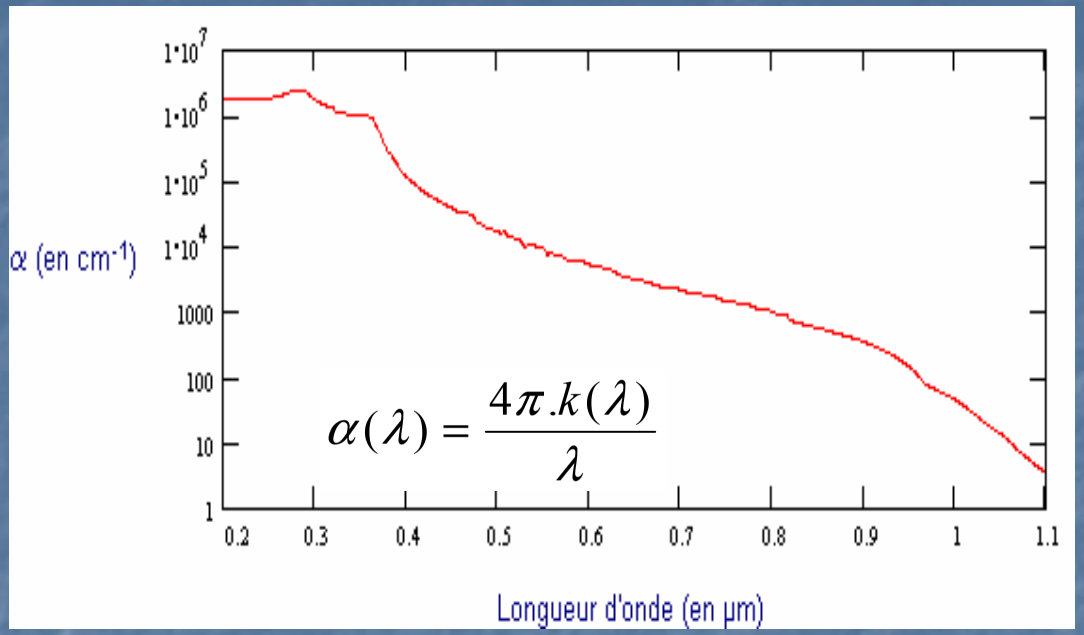
$$\eta(\lambda) = \frac{NbreMoyenphotoelectrons(\lambda)/pixel}{NbreMoyenphotons(\lambda)/pixel}$$



$$\eta(\lambda) = T_total(\lambda).(\eta_{dep}(\lambda) + \eta_n(\lambda))$$

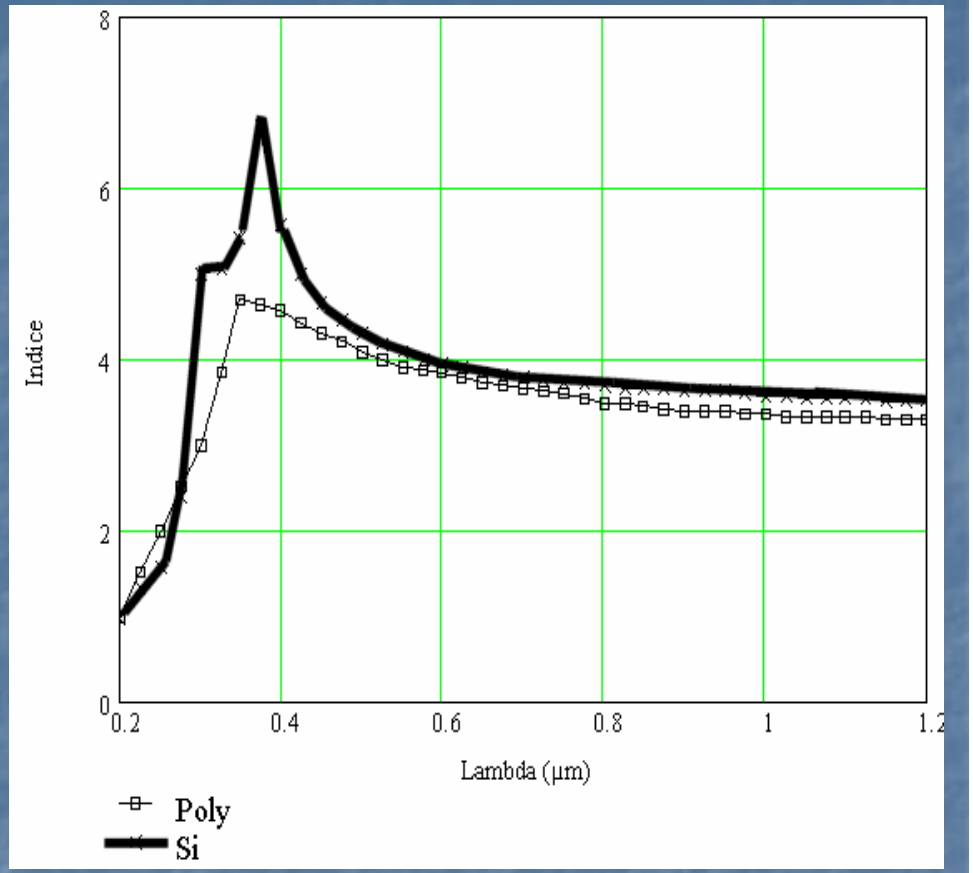
T_Total : Transmission optique totale
η_{dep} : rendement quantique dans la zone dépeuplée
η_n : rendement quantique dans la zone neutre

Rendement Quantique
Propriétés optiques du silicium



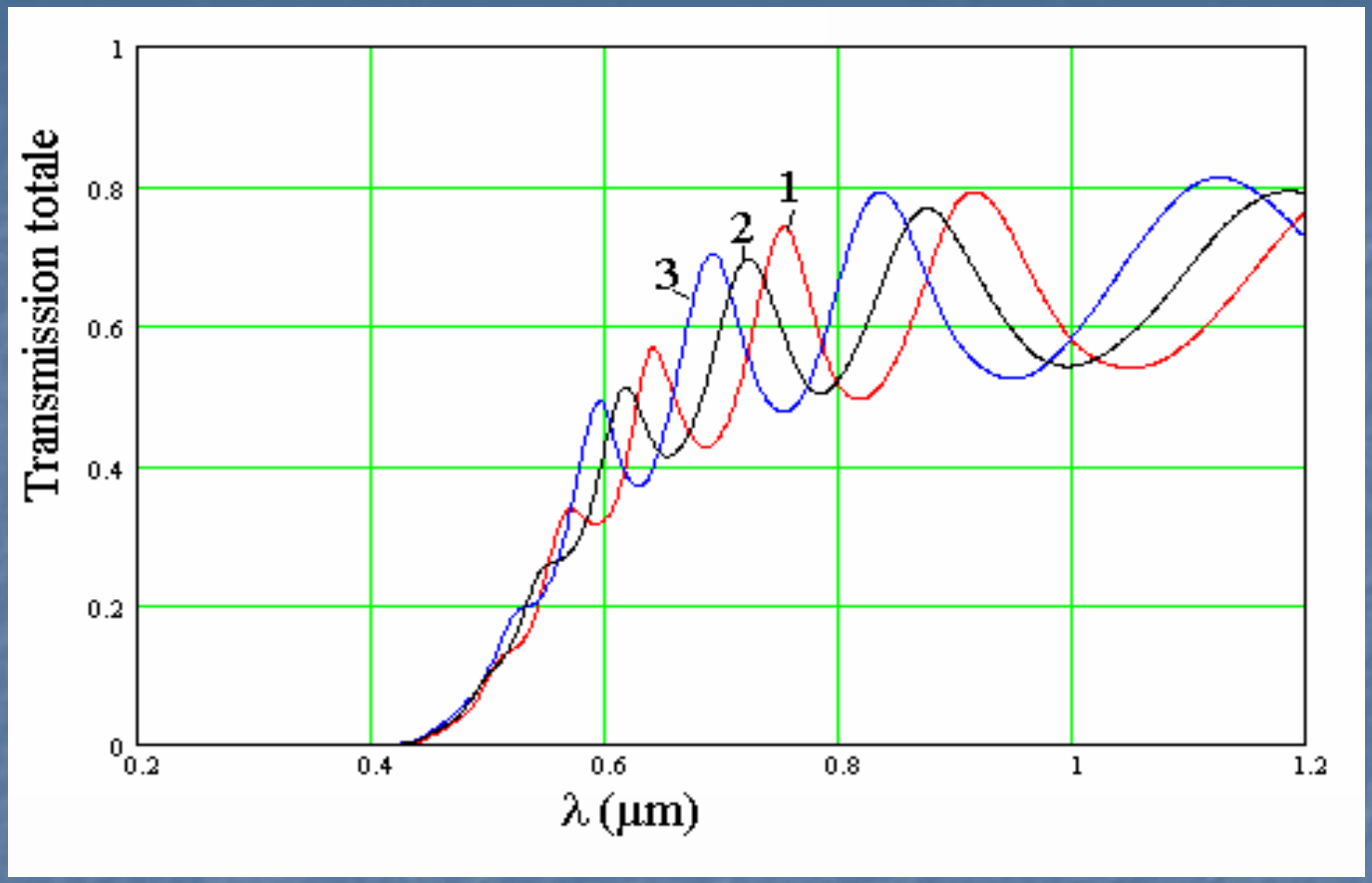
K(λ) : partie imaginaire de l'indice de réfraction

Absorption dans le silicium :
Tout le bleu est absorbé en surface
Plus transparent dans le rouge



Indice de réfraction du silicium :
Stable entre 0.5 et 1.1µm
Très tourmenté entre 0.2 et 0.5µm

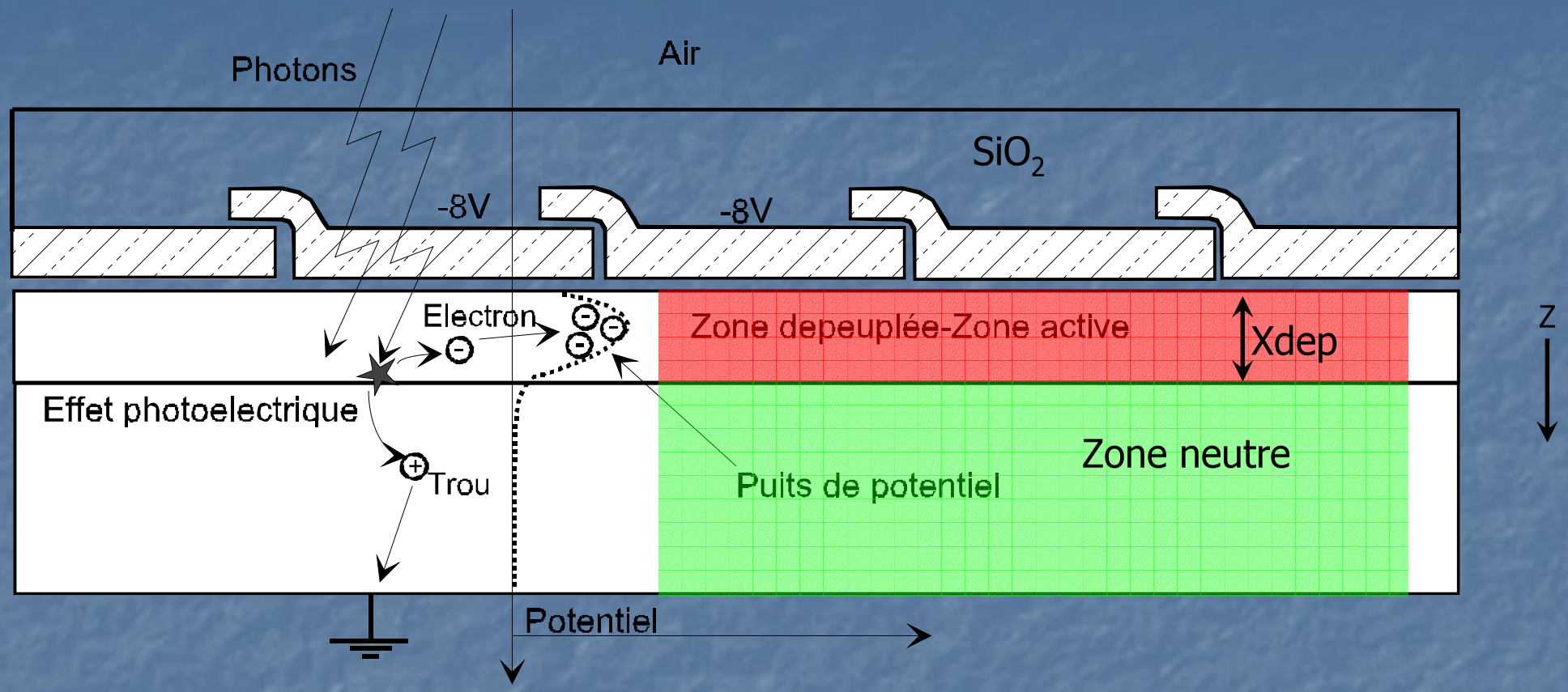
Rendement Quantique : transmission optique des 4 couches



$$Mtotal(\lambda) = \frac{M_{passivation}(\lambda).M_{polysilicium}(\lambda).M_{oxyde_mince}(\lambda).M_{Si}(\lambda)}{t_{air\rightarrow passivation}(\lambda).t_{passivation\rightarrow polysilicium}(\lambda).t_{polysilicium\rightarrow SiO2}(\lambda).t_{SiO2\rightarrow Si}(\lambda)}$$

- Matrice de propagation pour chaque couche
- Calcul de la transmission : effet de couches minces
- Polysilicium absorbe entre 0.2 et 0.4µm

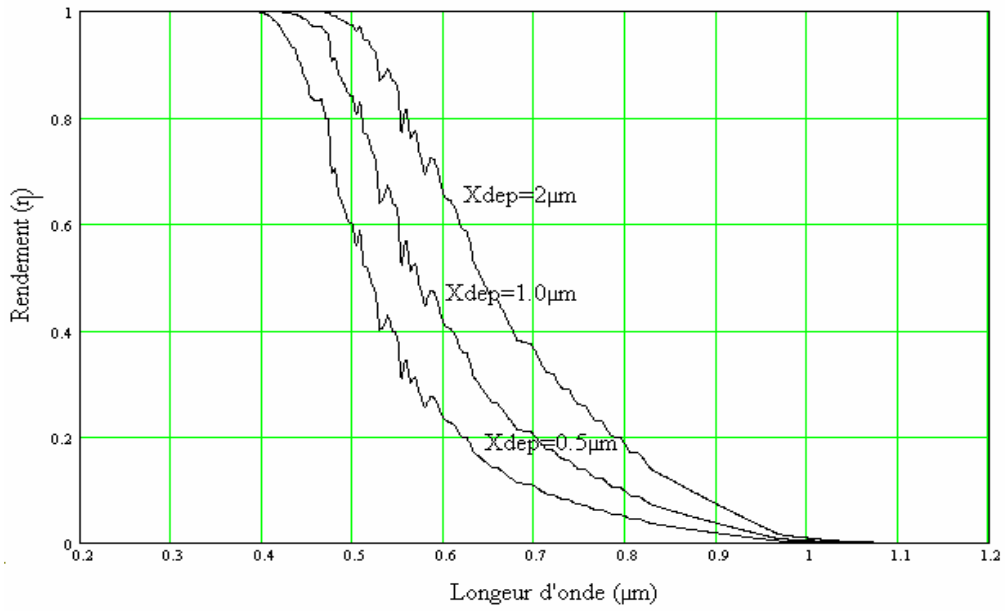
Calcul théorique du rendement quantique

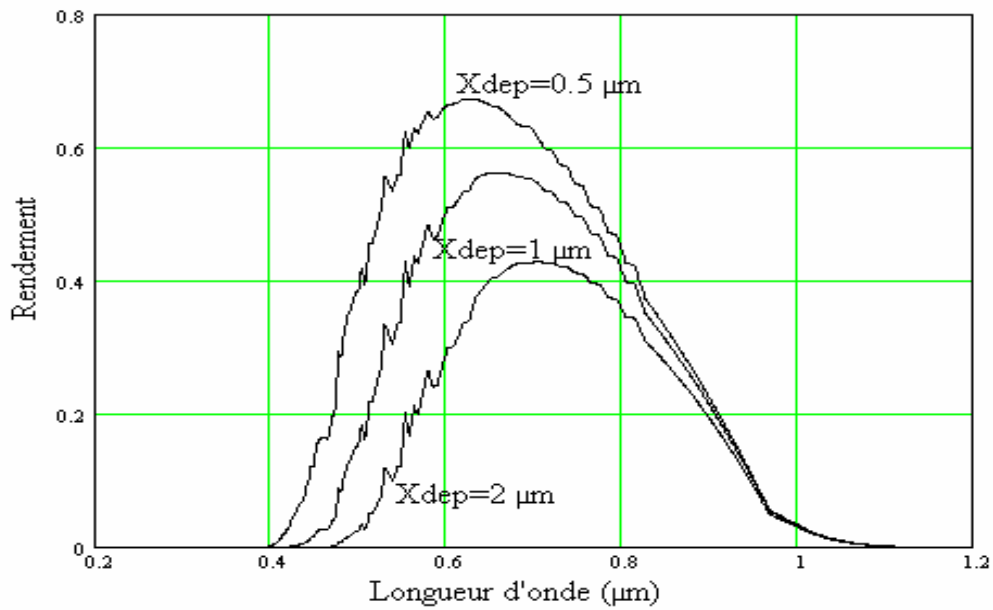


2 zones ou le processus photoélectrique s'opère :

- Dans la zone peuplée de profondeur Xdep (qq µm)
- Dans le substrat ou la zone neutre

Calcul théorique du rendement quantique





Zone dépeuplée

Zone neutre

Dépend de la profondeur du depeuplement

$$X_{dep} = \frac{\varepsilon_{si}}{C_{ox}} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{2 \cdot V_{PG} \cdot C_{ox}^2}{q \cdot \varepsilon_{si} \cdot N_A}} - 1 \right]^2$$

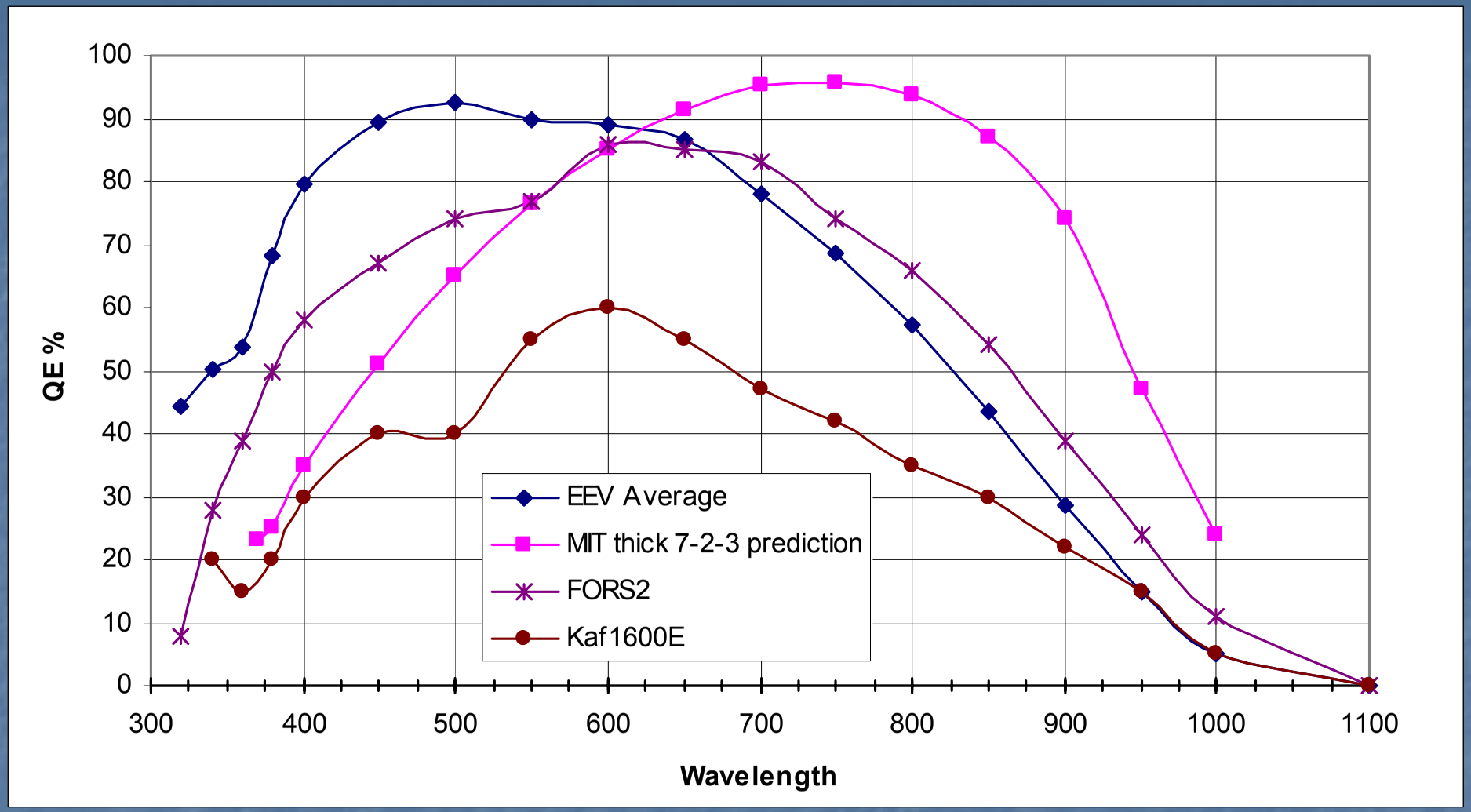
ε_{si} **: permittivité du silicium (=10^{-12} F/cm)**

C_{ox} **: capacité par unité de surface de la couche d'oxyde mince (= εox/tox)**

V_{PG} **: tension appliquée sur la grille (V)**

N_A **: dopage du substrat (atomes/cm3)**

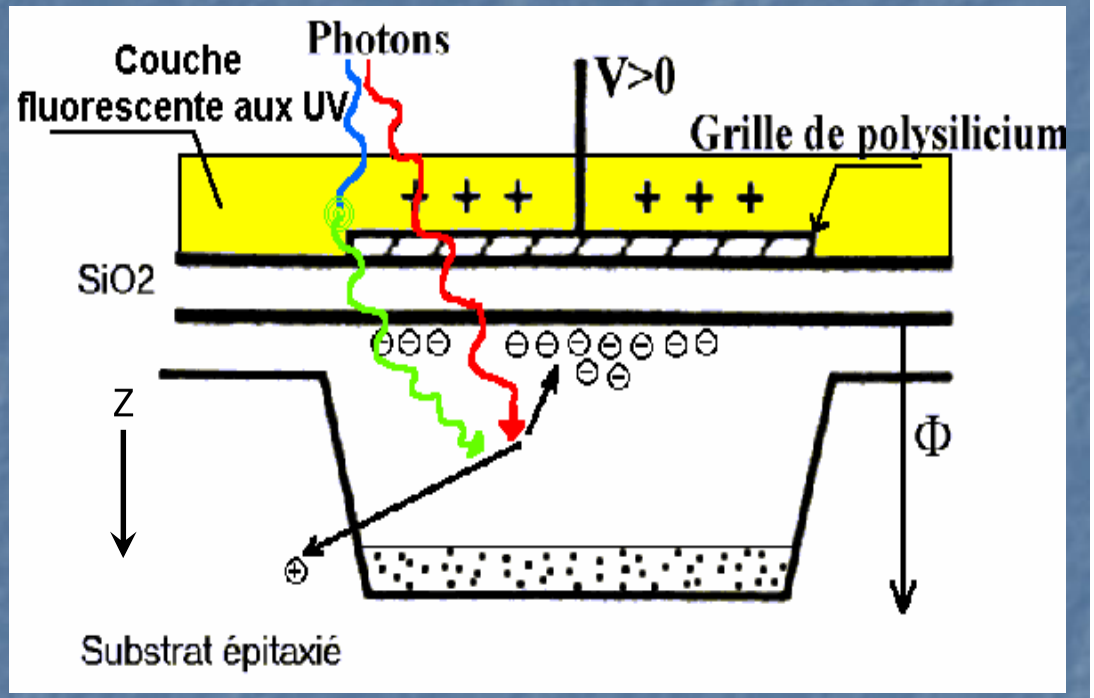
Exemples de Rendements quantiques

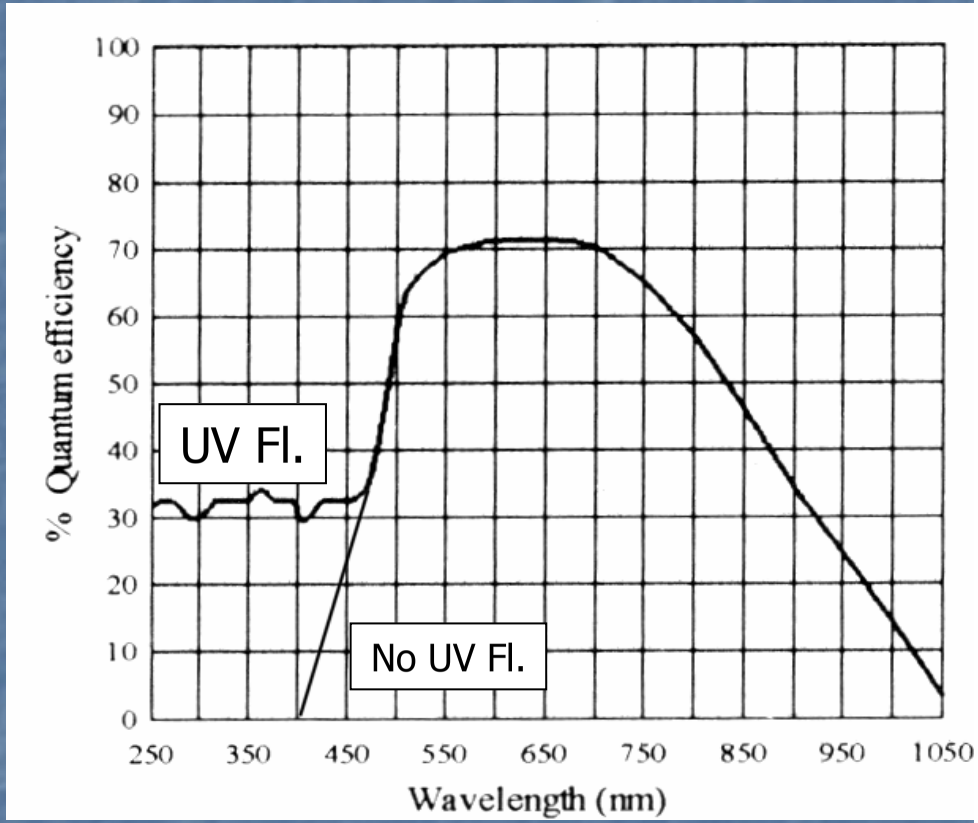


$$\eta(\lambda) = T_total(\lambda).(\eta_{dep}(\lambda) + \eta_n(\lambda))$$

CCD traité pour l 'UV et le bleu : « UV-Flooding »

- Couche de Metachromes ou Luminogen
- Fluorescence UV, vers des longueurs d'ondes visibles

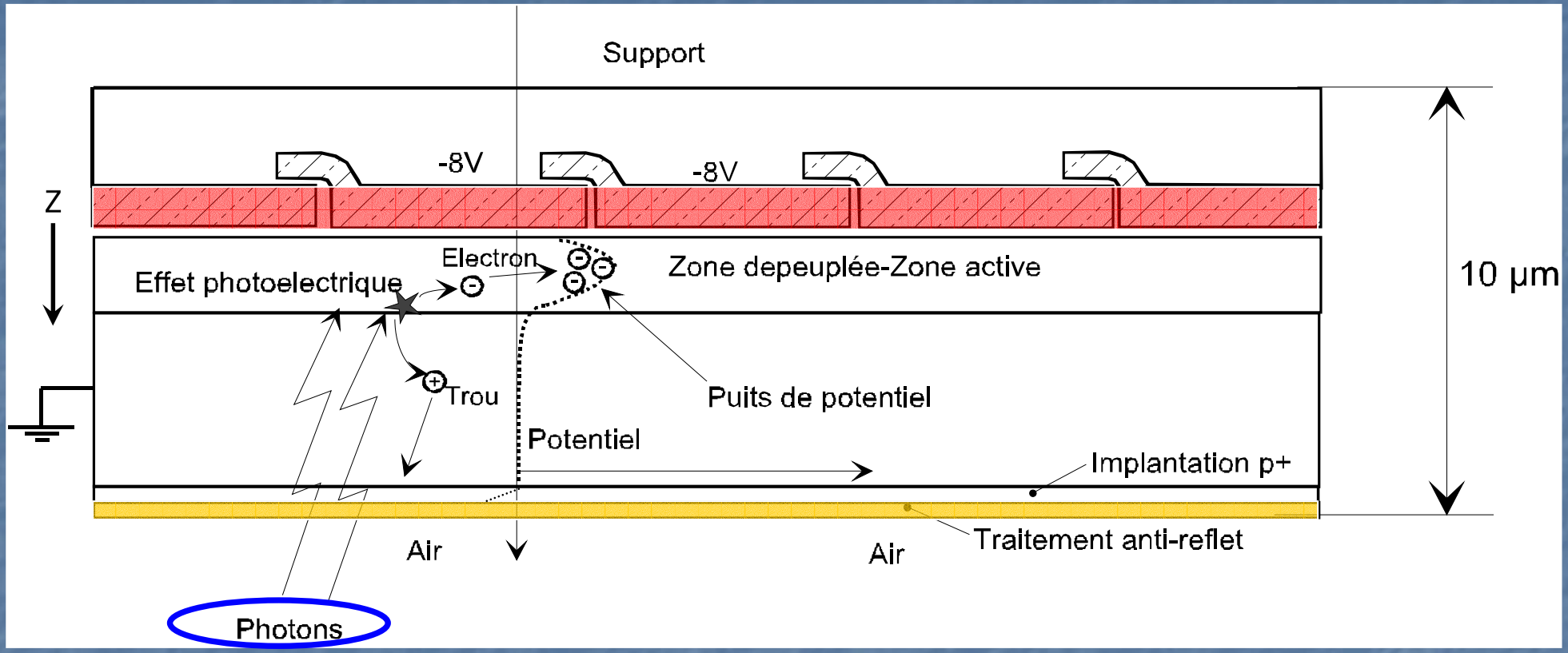




- Stabilité de la couche, durée de vie limitée

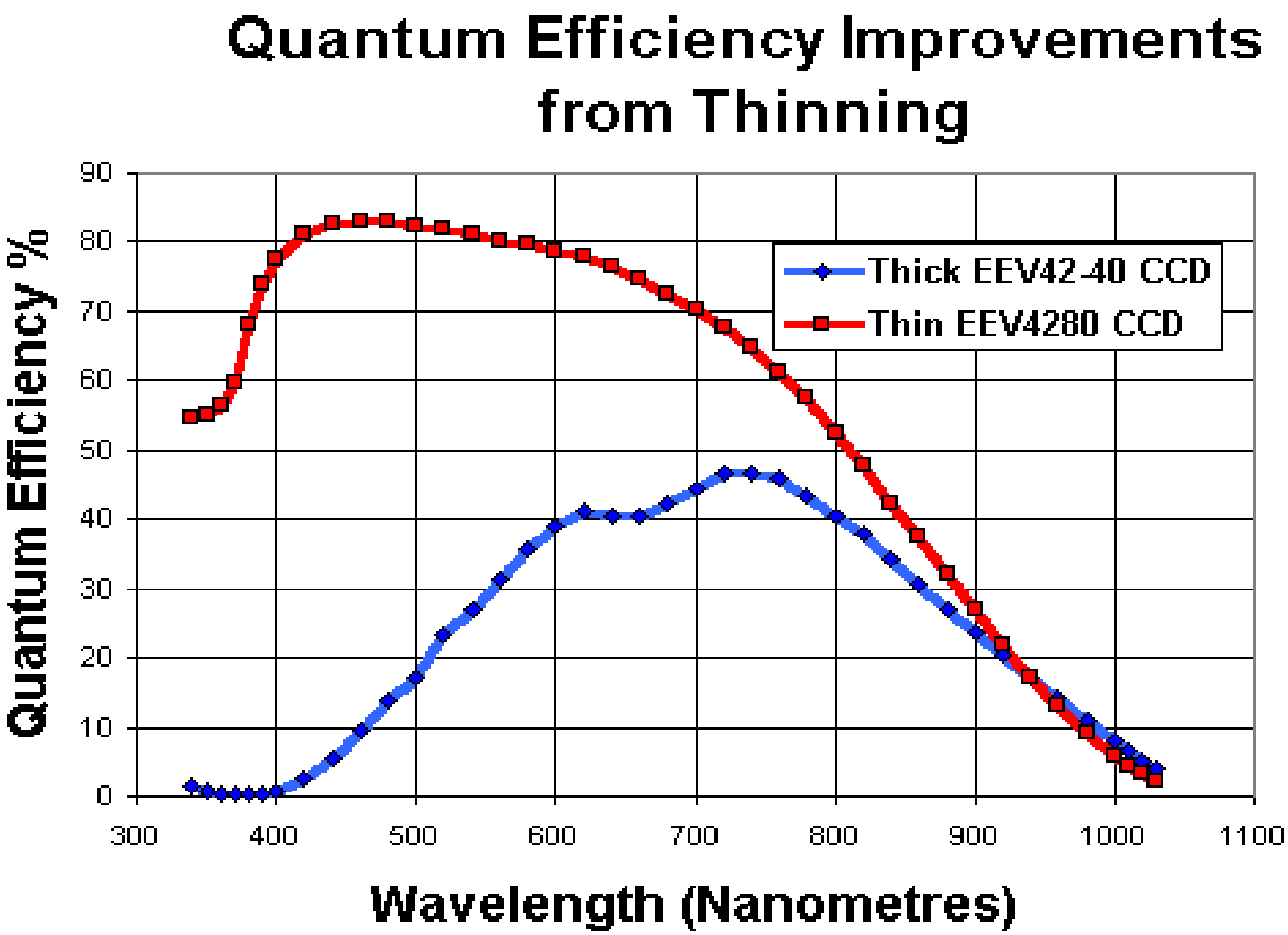
Rendement quantique : améliorations

Principe des CCDs amincis ou éclairés par l'arrière

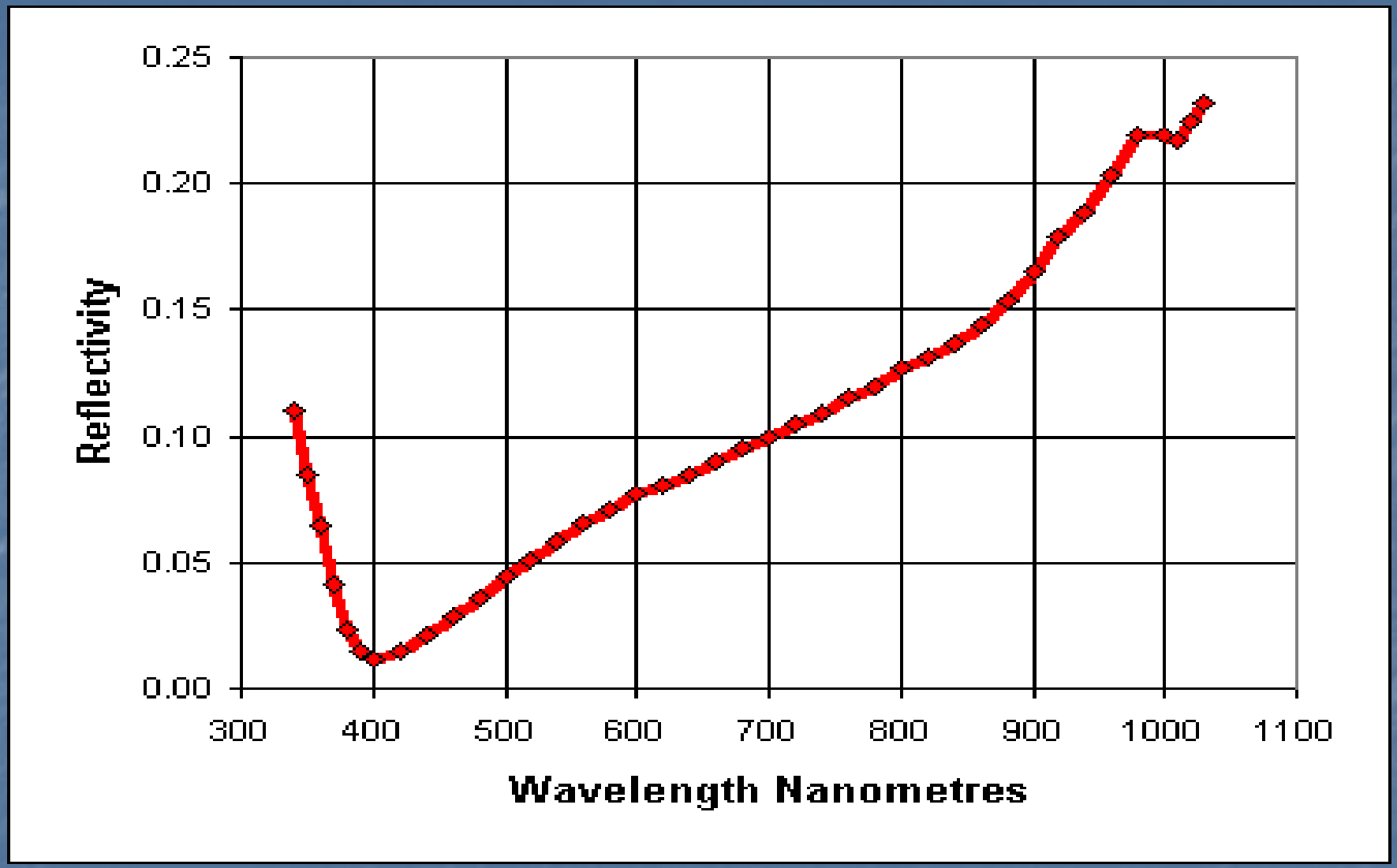


- Amincissement par l'arrière de 700µm à 10µm
- Implantation P+ (critique)
- Traitement anti-reflet (HfO_2 ou TiO_2)
- Eclairement par l'arrière

Rendement quantique : améliorations

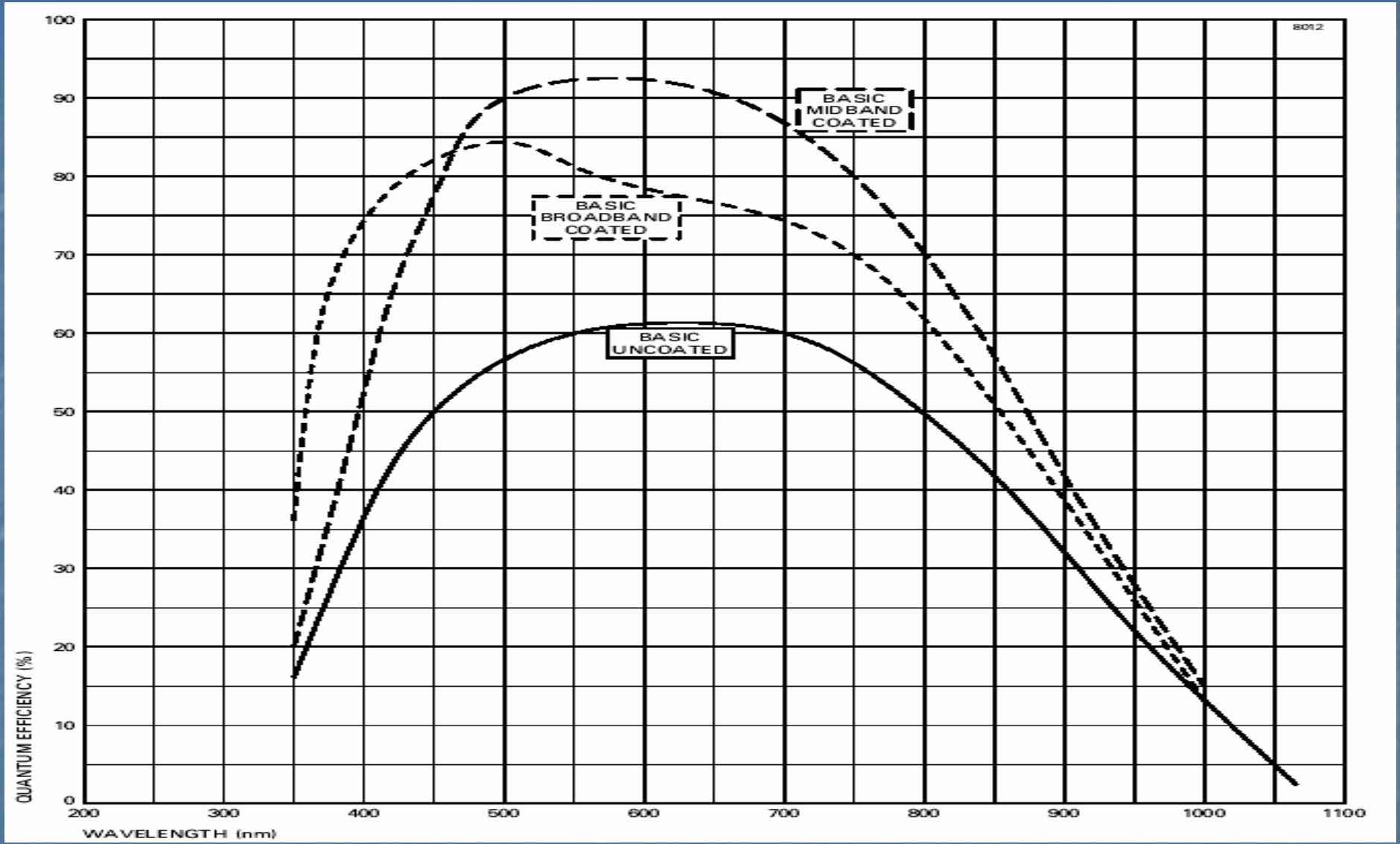


Rendement quantique : améliorations



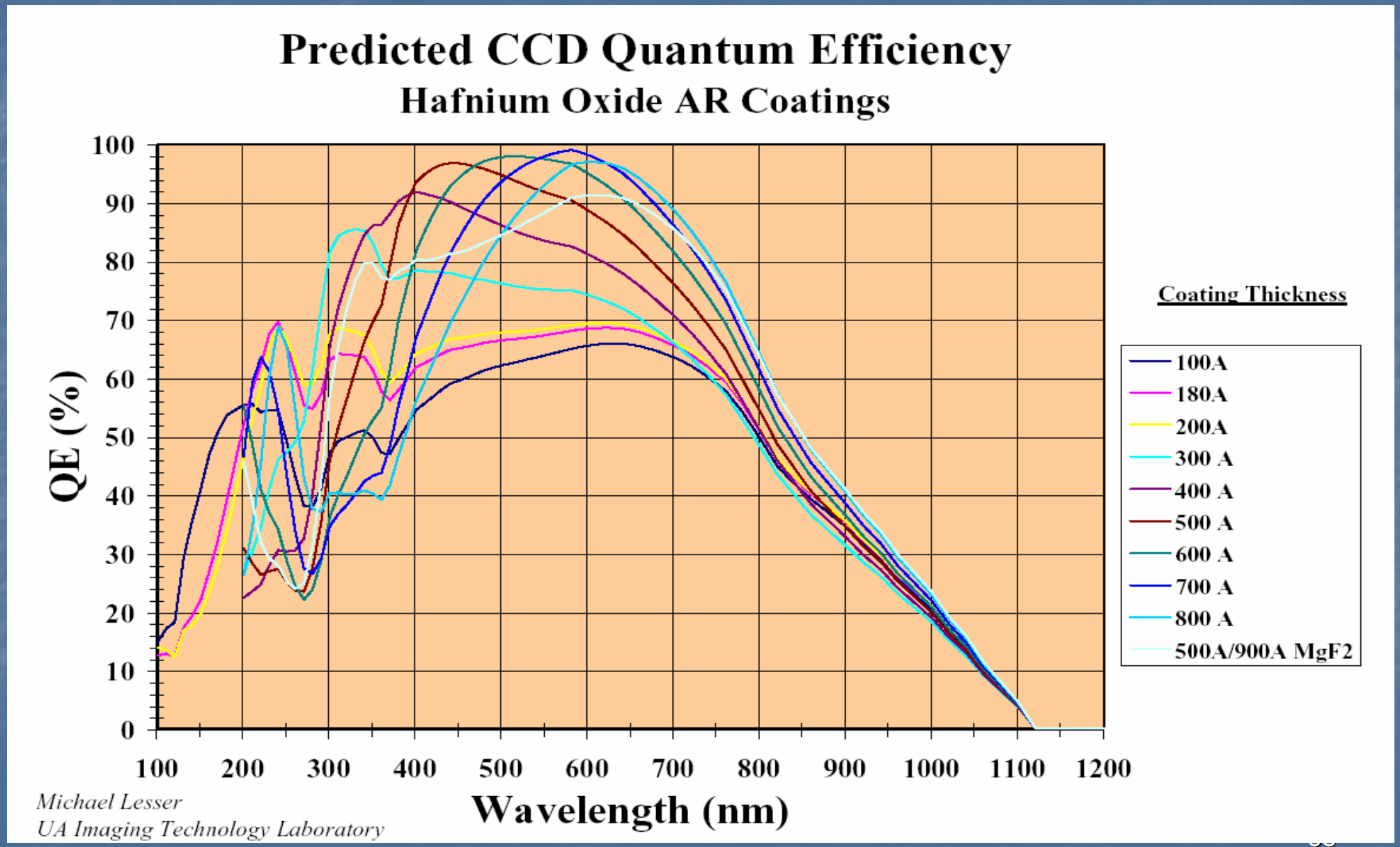
Traitement anti reflet : déterminant (HfO_2) !

Rendement quantique : améliorations

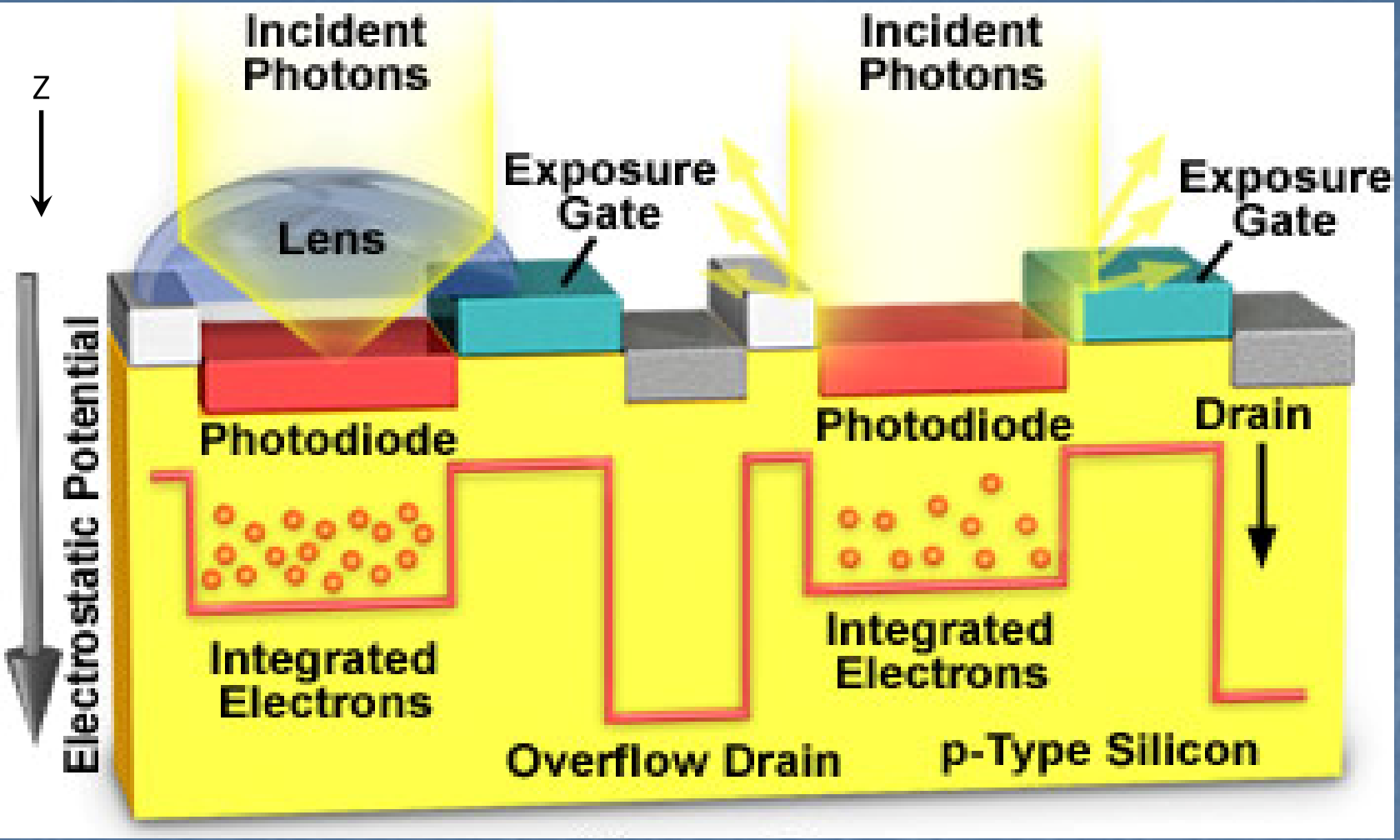


Traitement anti reflets et effets sur le rendement quantique

Rendement quantique : AR coating

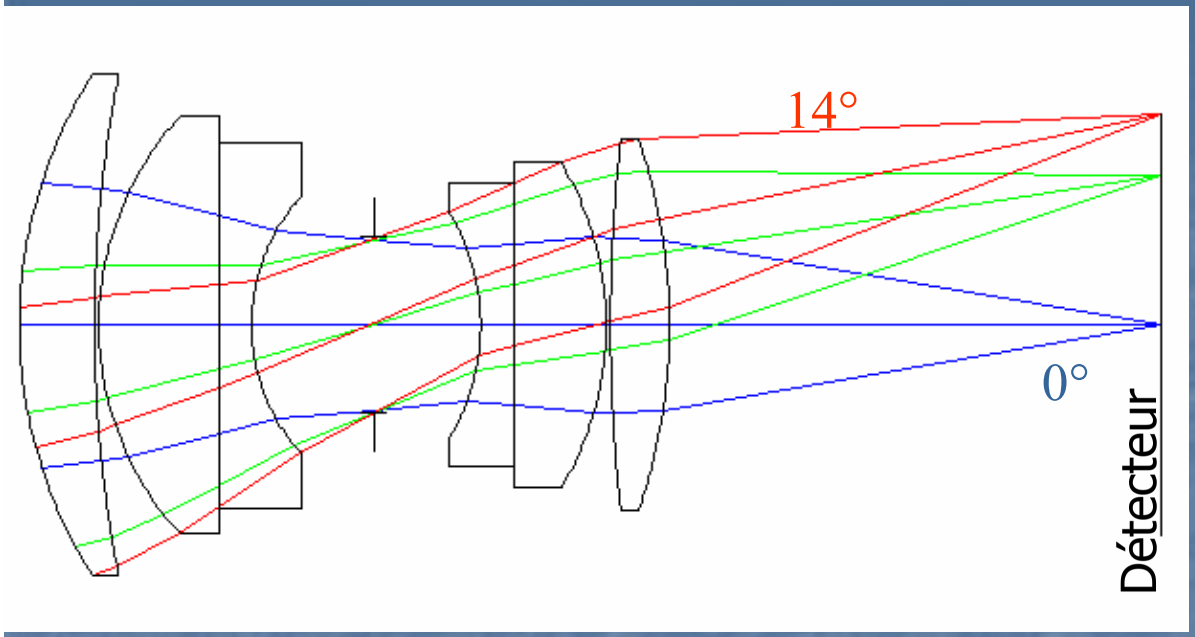


Microlentilles pour CCD interligne

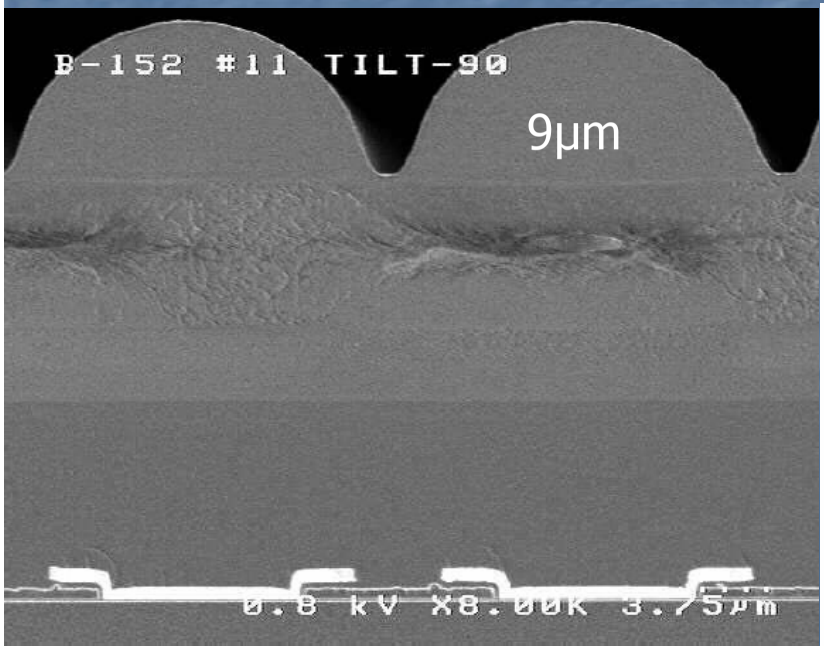


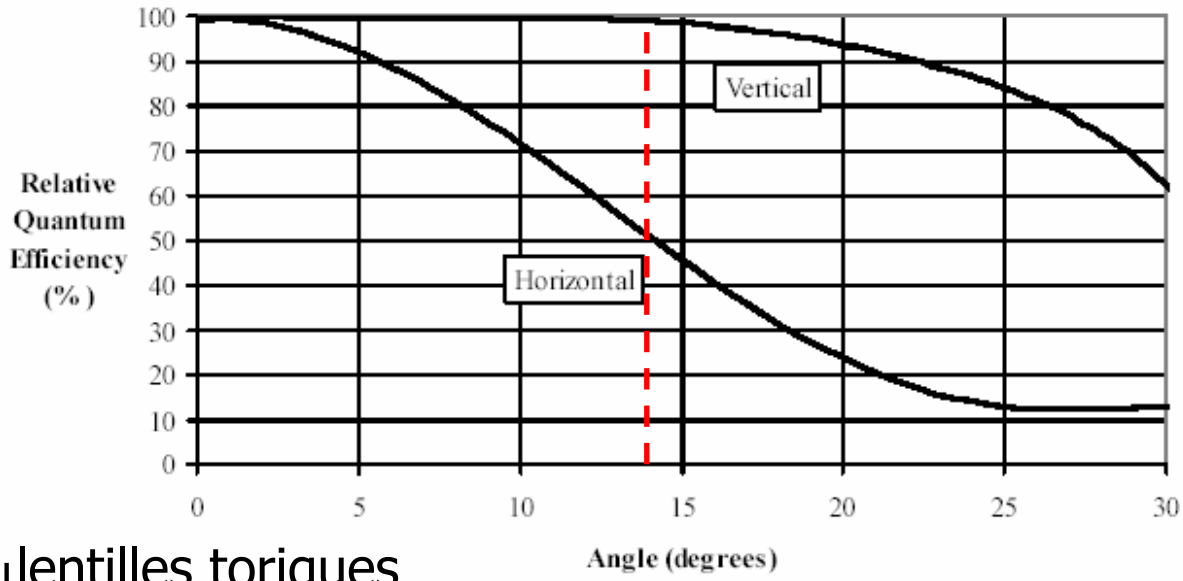
- Microlentilles : adapté des rapports F/D
- Très efficace, > 10-15% de RQE supplémentaire

Effets de variation de QE par les microlentilles



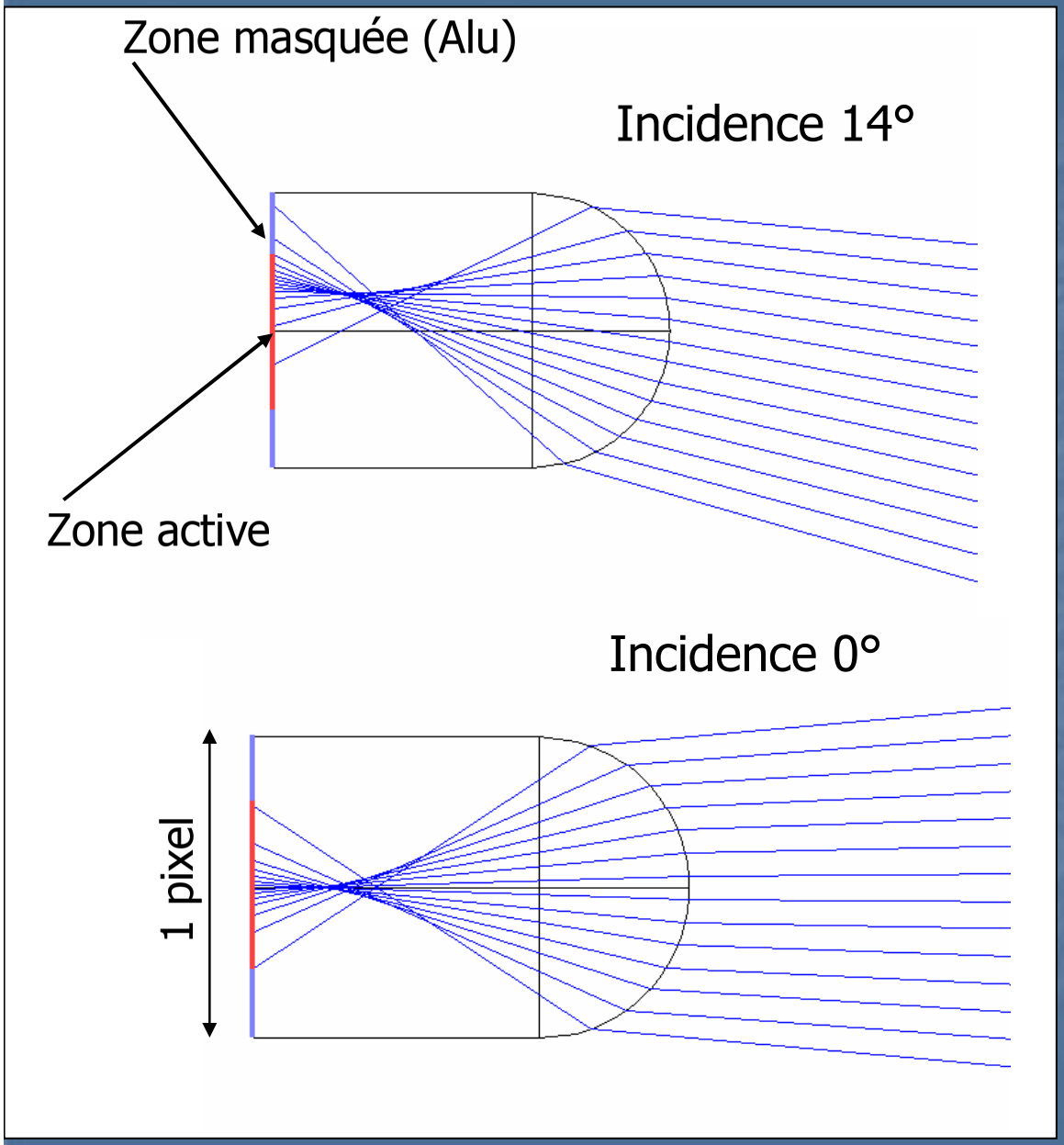
- Rendement Quantique variable
- objectifs grand angle
- optiques ouvertes

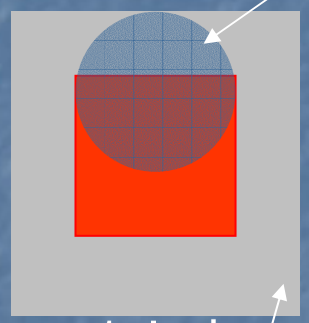


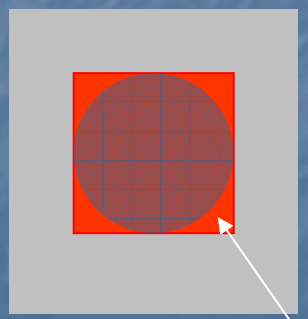


µlentilles toriques

Perte de rendement quantique par les µlentilles

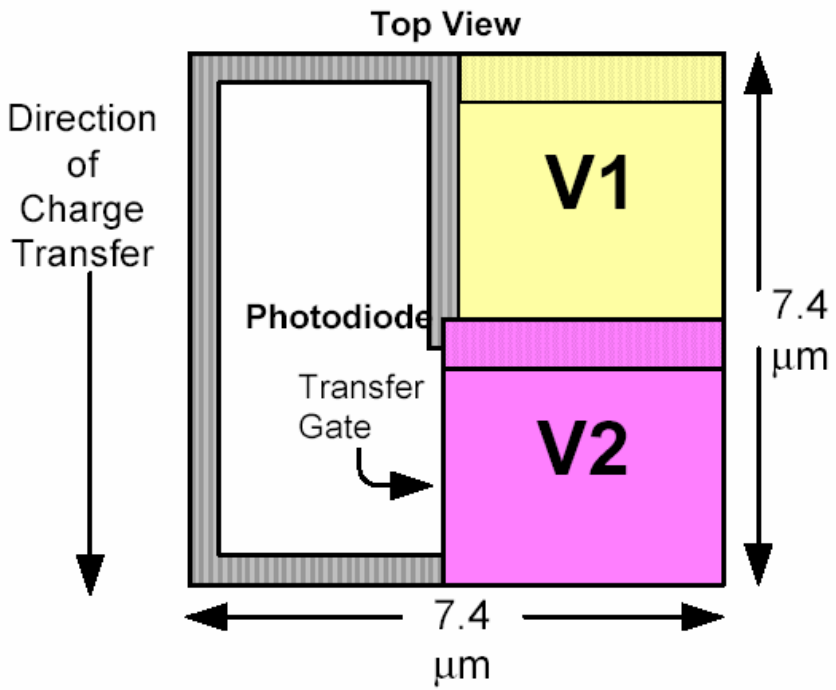






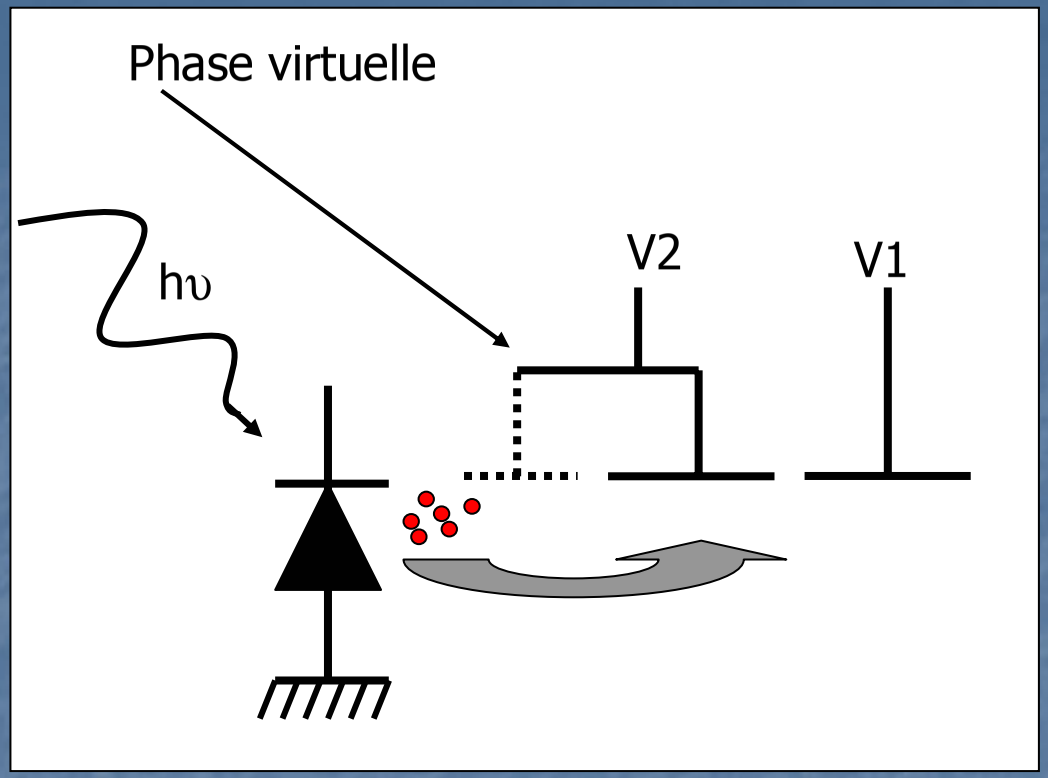
Limitation du F/D (ouverture) + effet angulaires

Pixel CCD interligne à photodiode

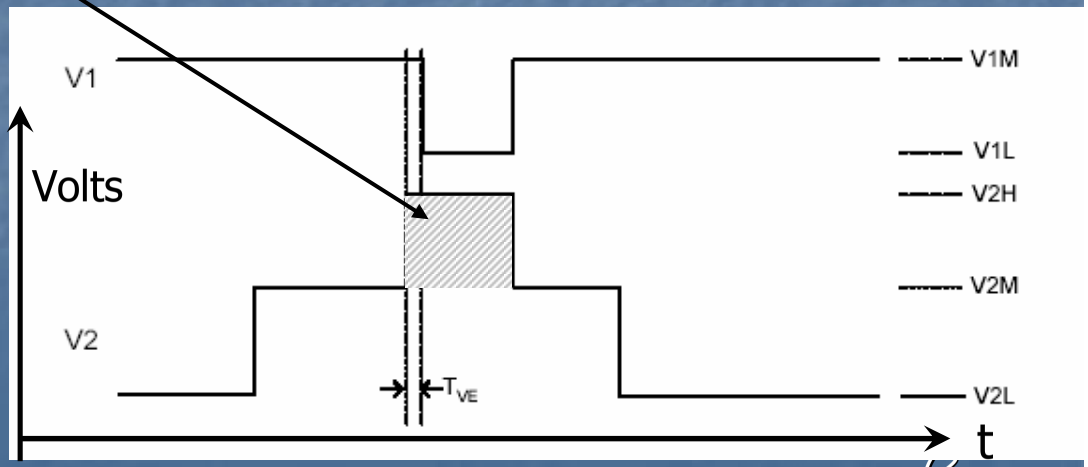


True Two Phase Burried Channel VCCD
Lightshield over VCCD not shown

=

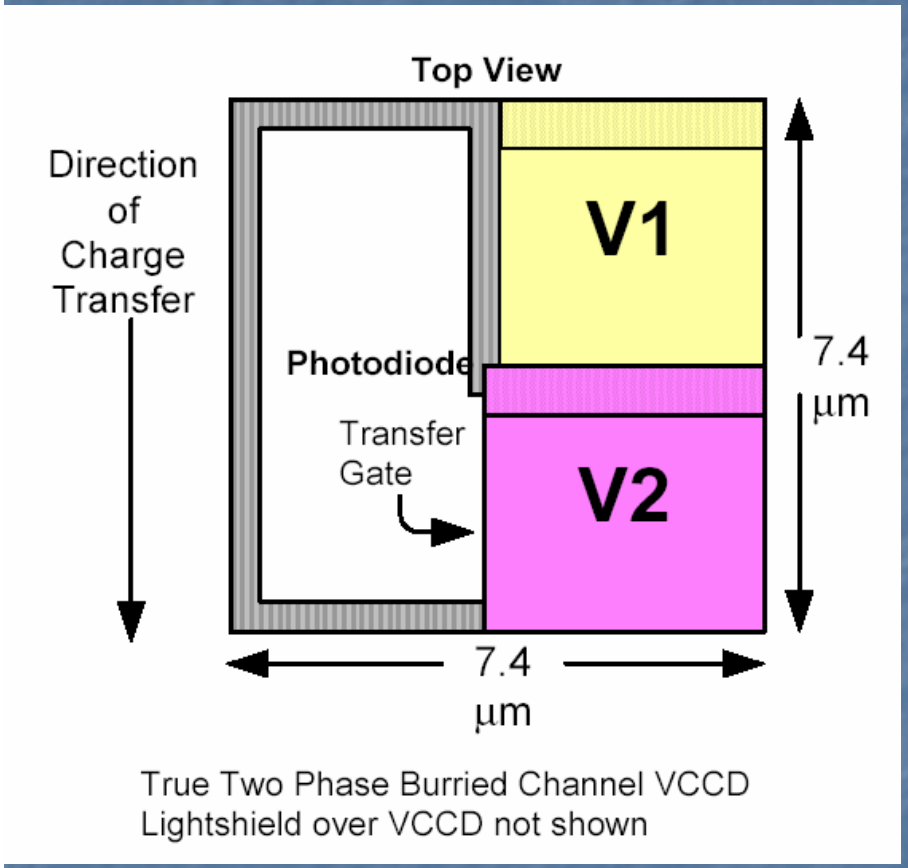


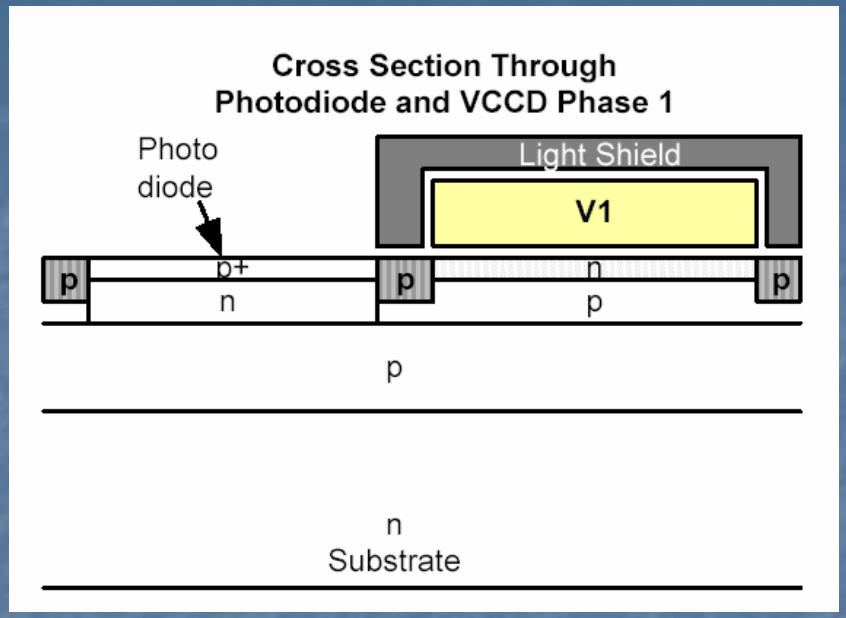
Activation de la phase virtuelle

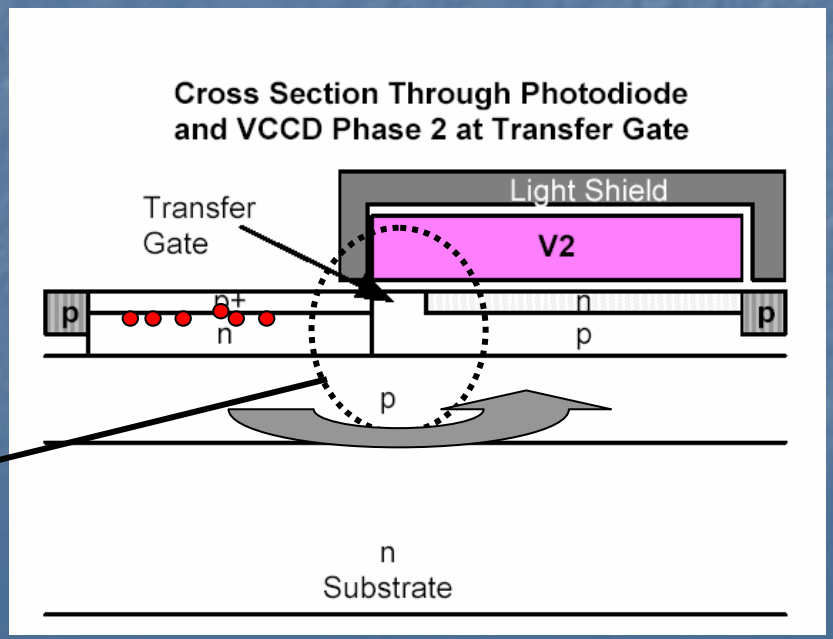


- Fillfactor 50%
- V1 et V2 pour le transport des charges vertical

Pixel CCD interligne à photodiode

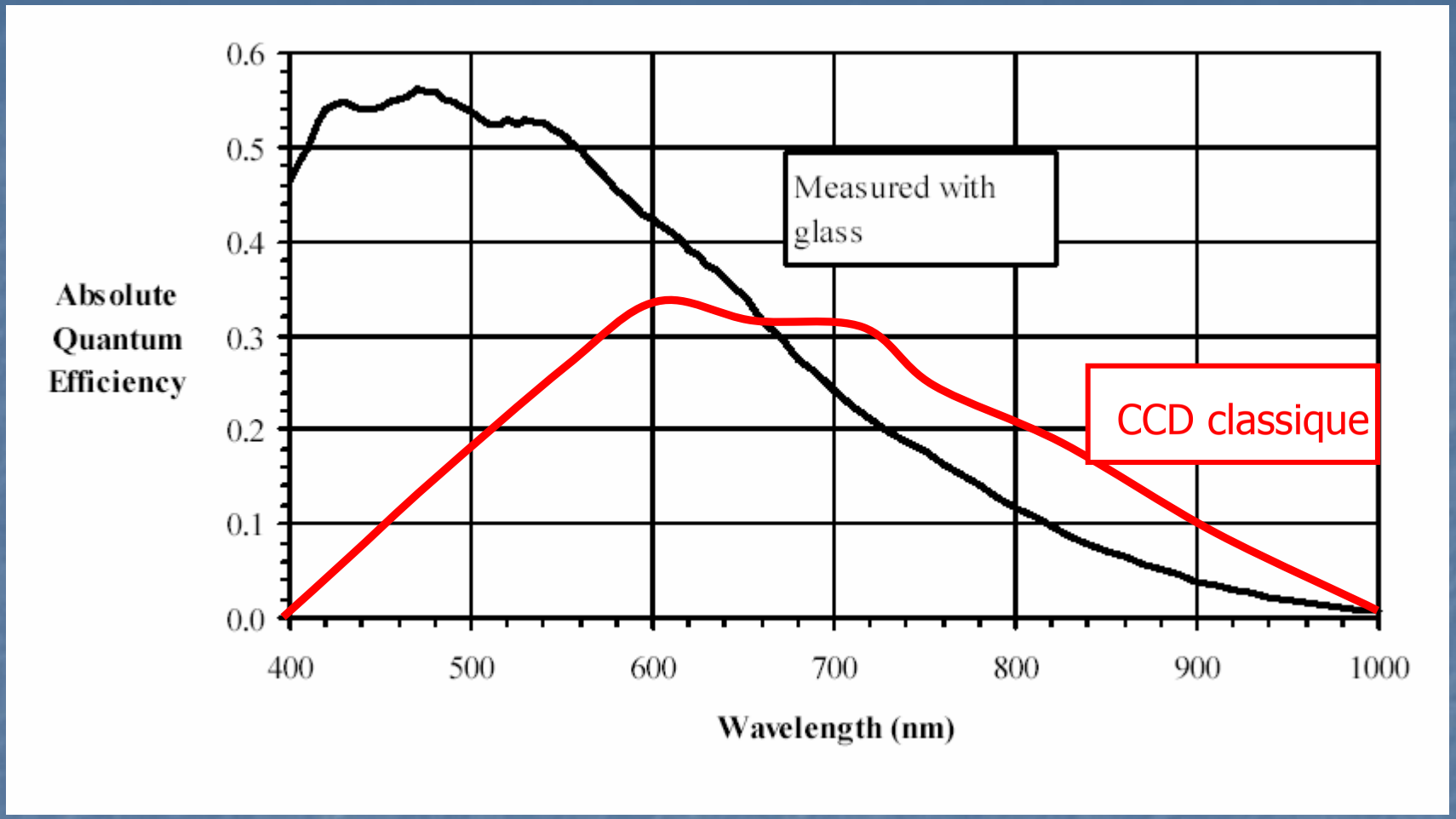






Phase virtuelle

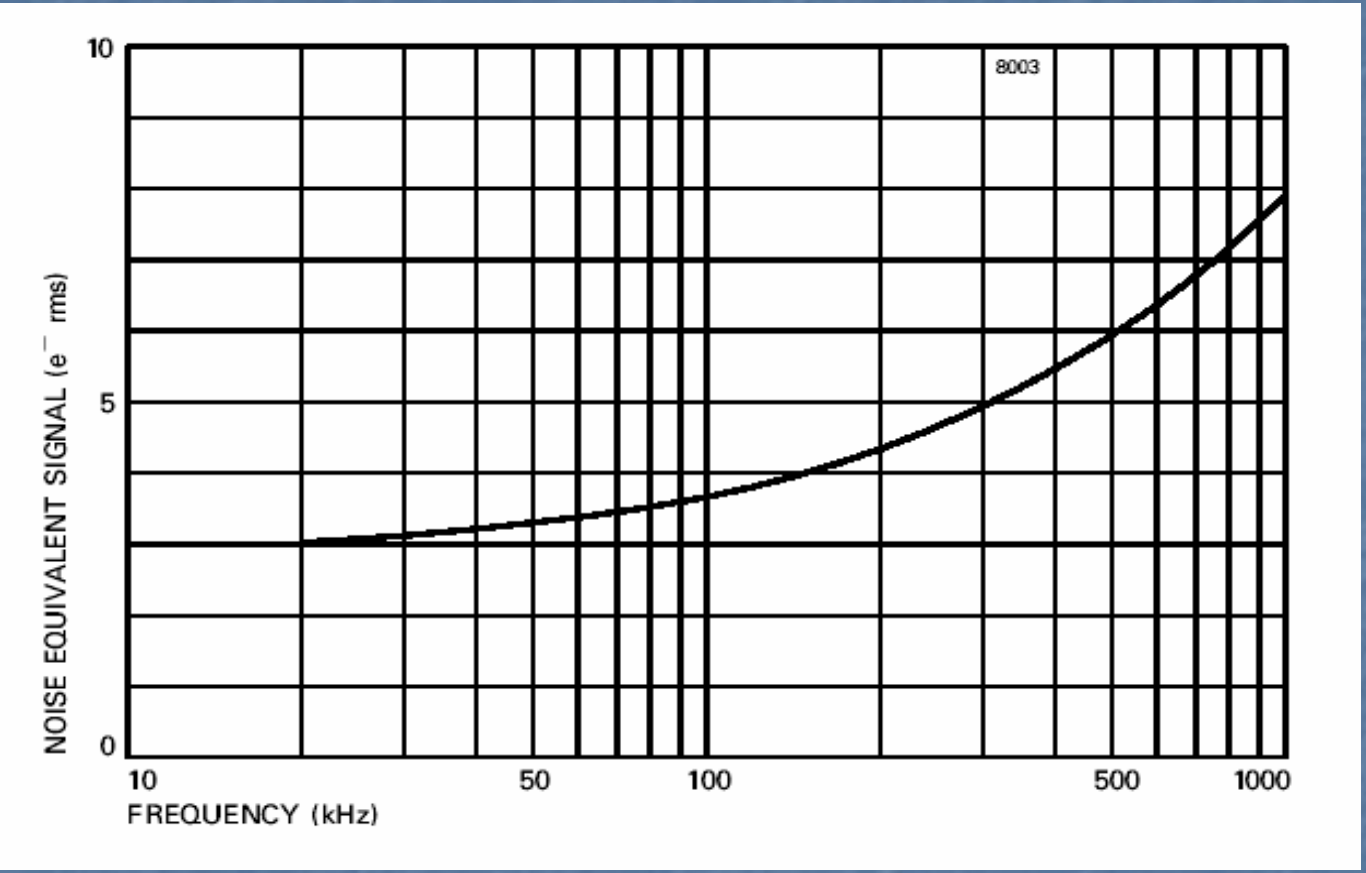
Pixel CCD interligne à photodiode avec microlentilles

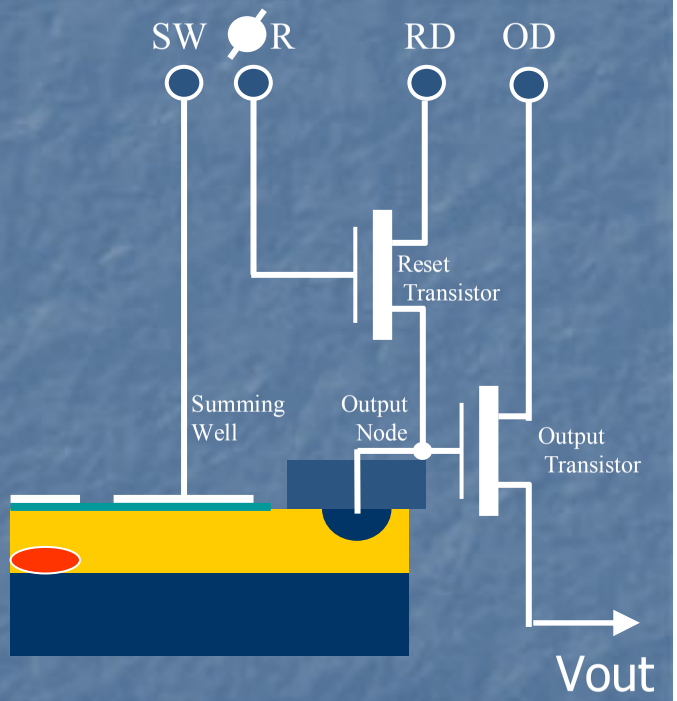


- Bon dans le bleu – vert
- Médiocre dans le proche IR, comparativement au bleu-vert

Le bruit de lecture

Bruit électronique de l'ampli de sortie Vout en µV

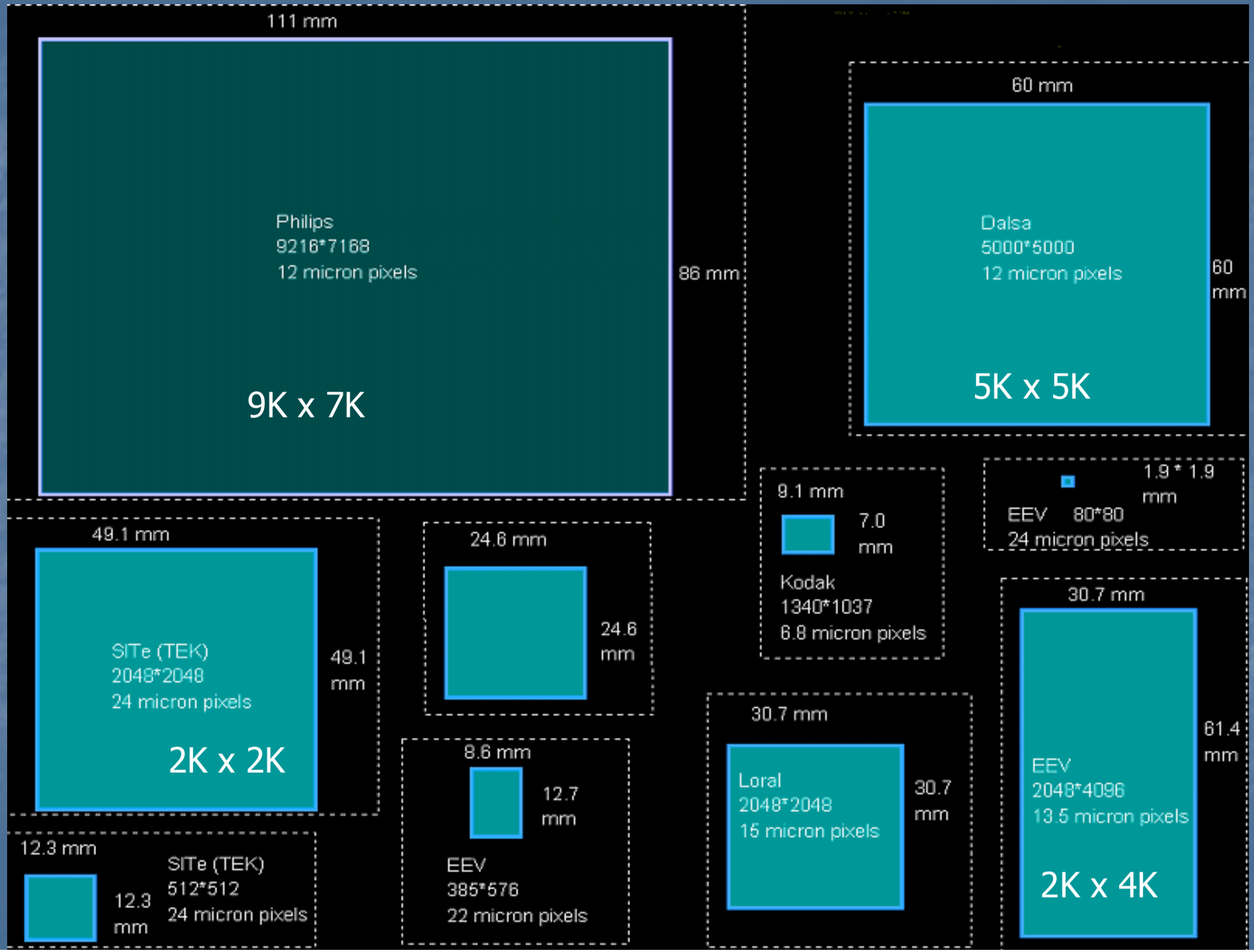




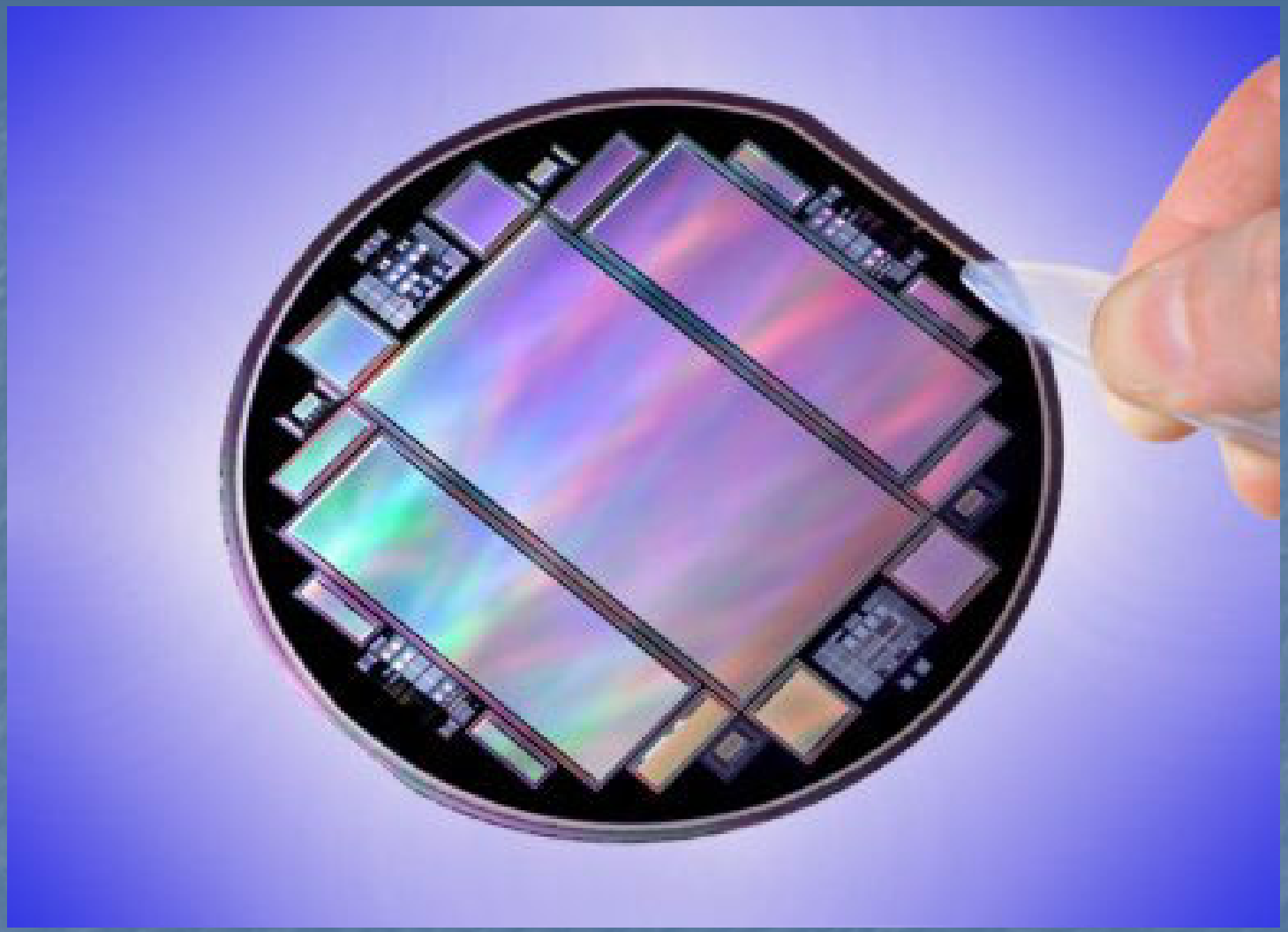
Dépend de la bande passante (vitesse de lecture, pixels/seconde)
Du au transistor buffer de l'ampli de sortie

CCD non scientifique : 30 à 50e- a 20 images par secondes

Résolution et format des CCD : état de l'art

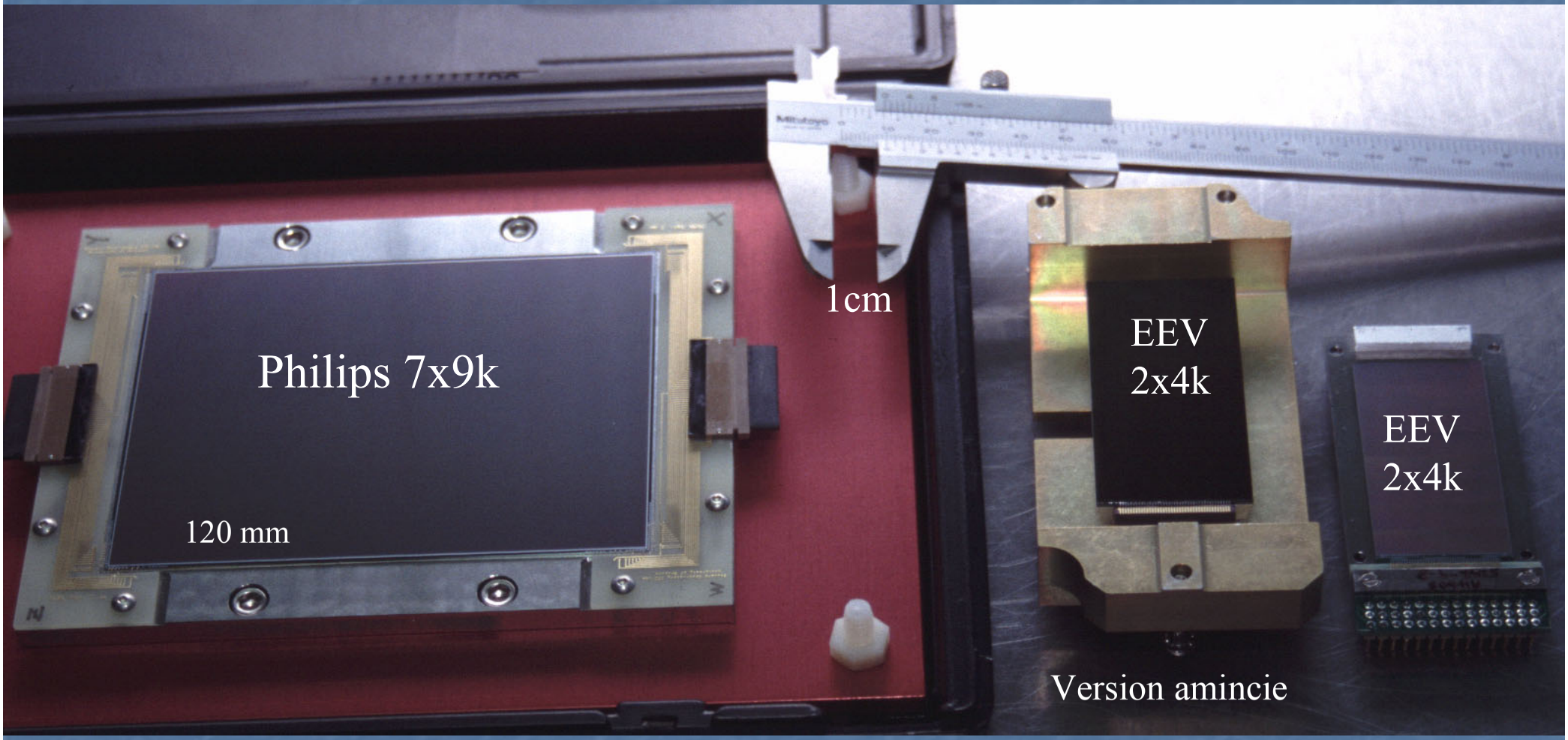


Fabrication des CCD

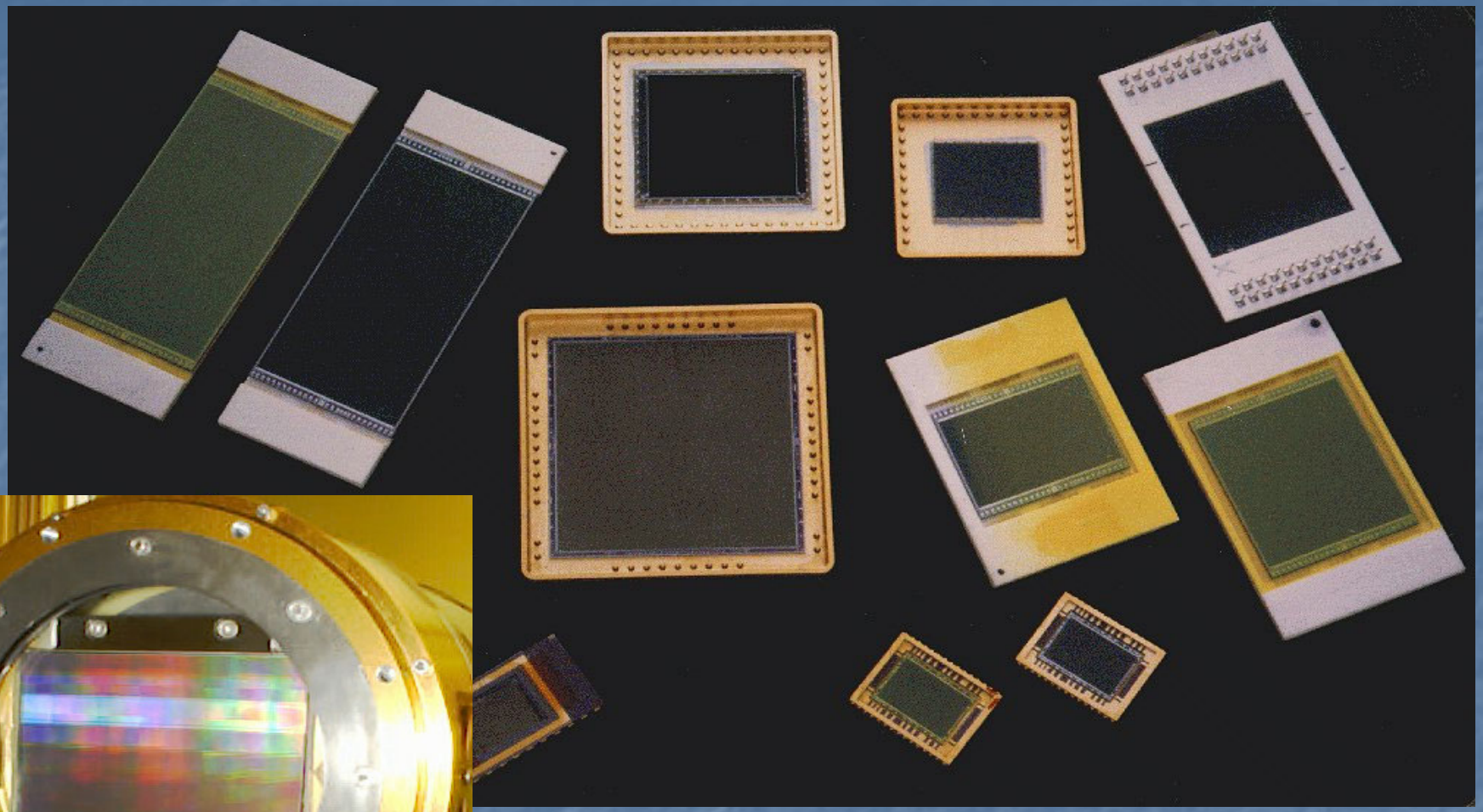


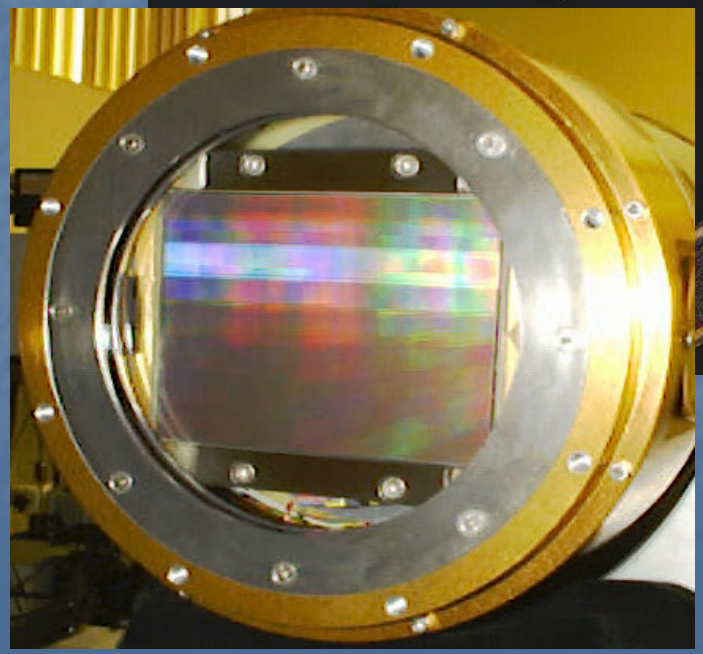
- Bien maîtrisée MAIS pas à la portée de n'importe quel fondeur de circuit
- Ligne de fabrication spéciale, en dehors de la ligne de production des CMOS
- lithographie 2-1µm, wafers de 8 pouces

Formats de CCD



Formats de CCD





Mosaïque de CCDs

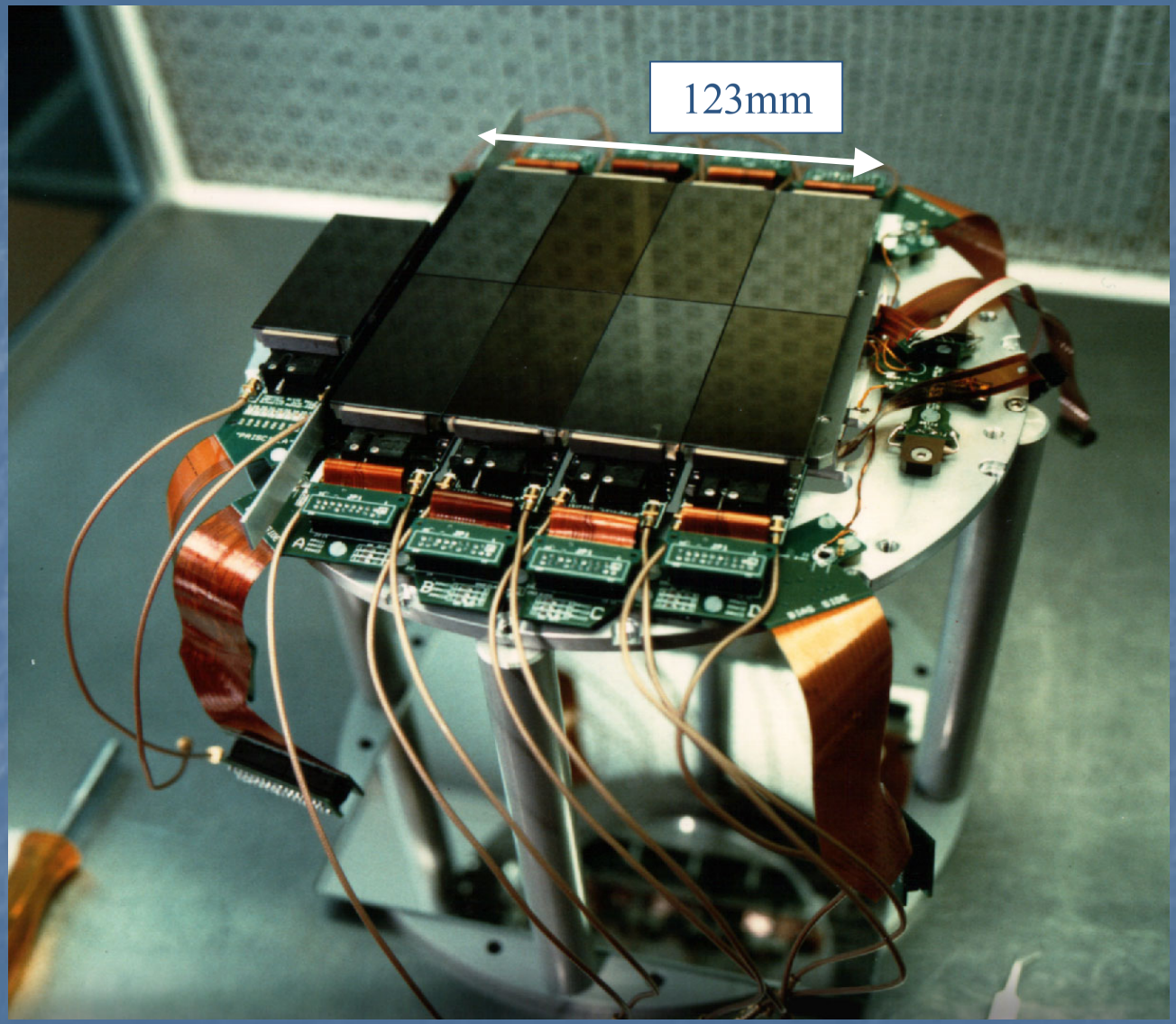
- Mosaïque de 8 CCD EEV

2x4k ⇨ **8x8 k**

- Ecart de :
  - 96 pixels en Y
  - 56 pixels en X

- Planéité mesurée par laser comprise entre +-20µm

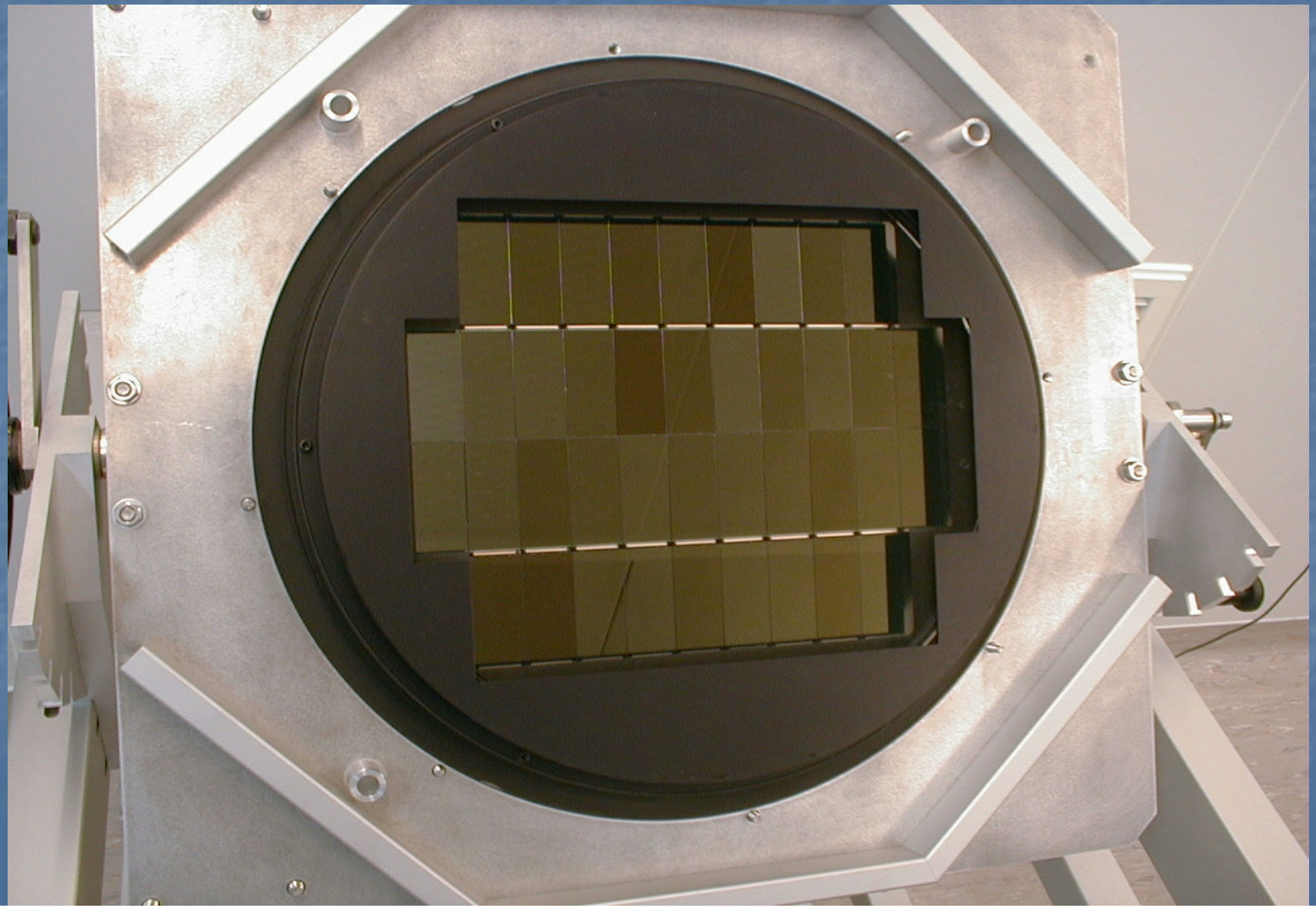
- Lecture en 27sec
- 1 image ⇨ 128Mo
- 4.5e- de bruit
- Piloté par un seul contrôleur Fiera
- CCD de guidage lu a 1Hz

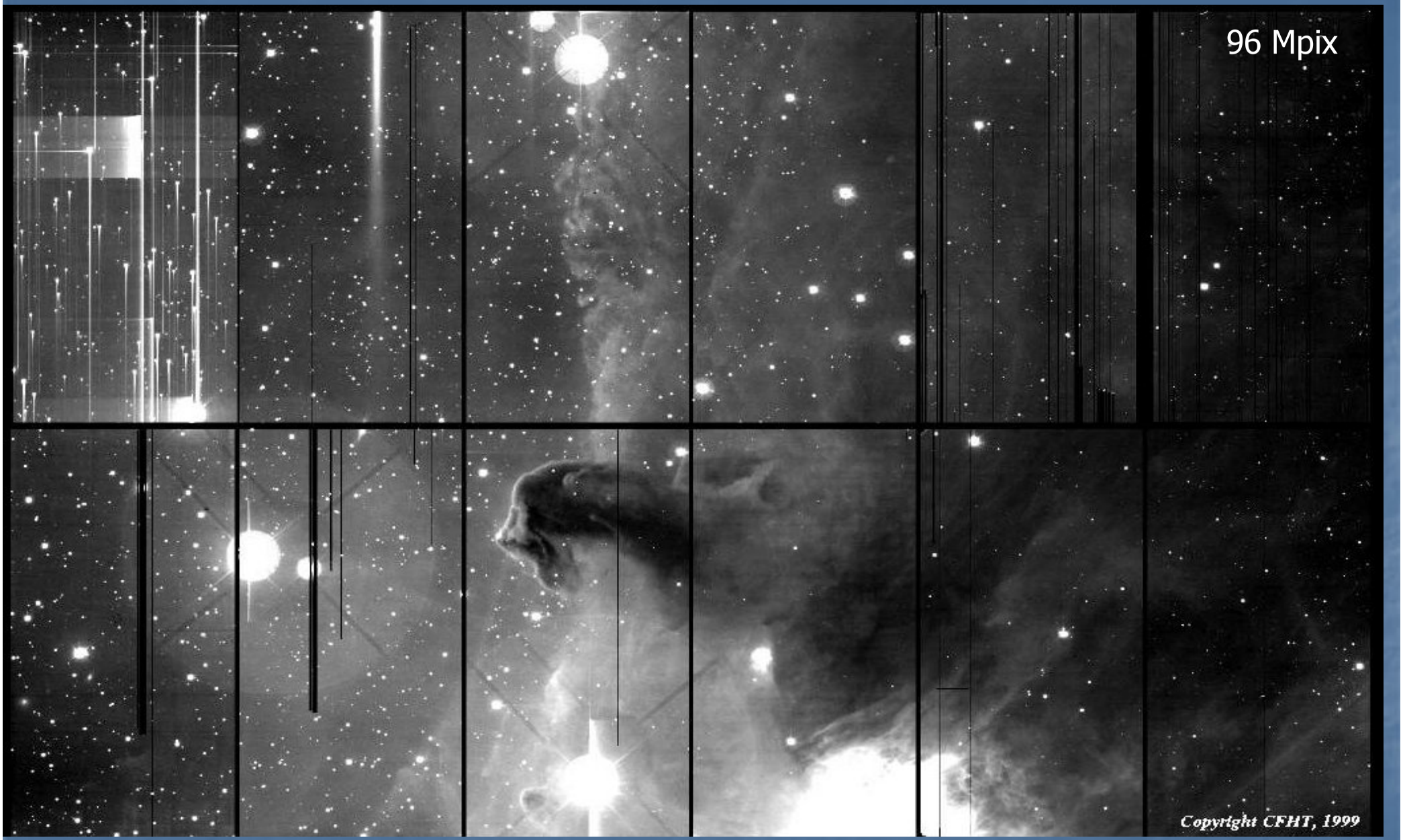


72 millions de pixels...

Megacam – CFHT - CEA

Mosaïque la plus grande du monde, 380 Mpixels de 15x15 µm



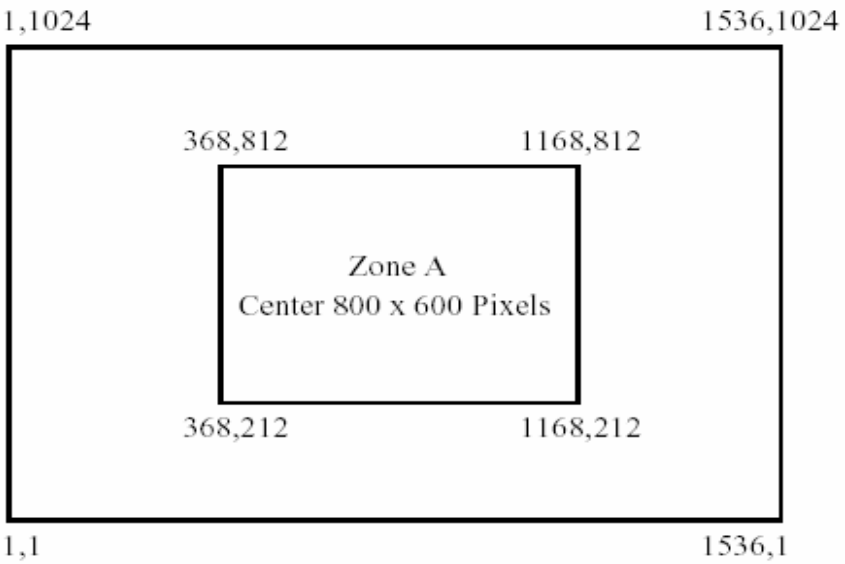


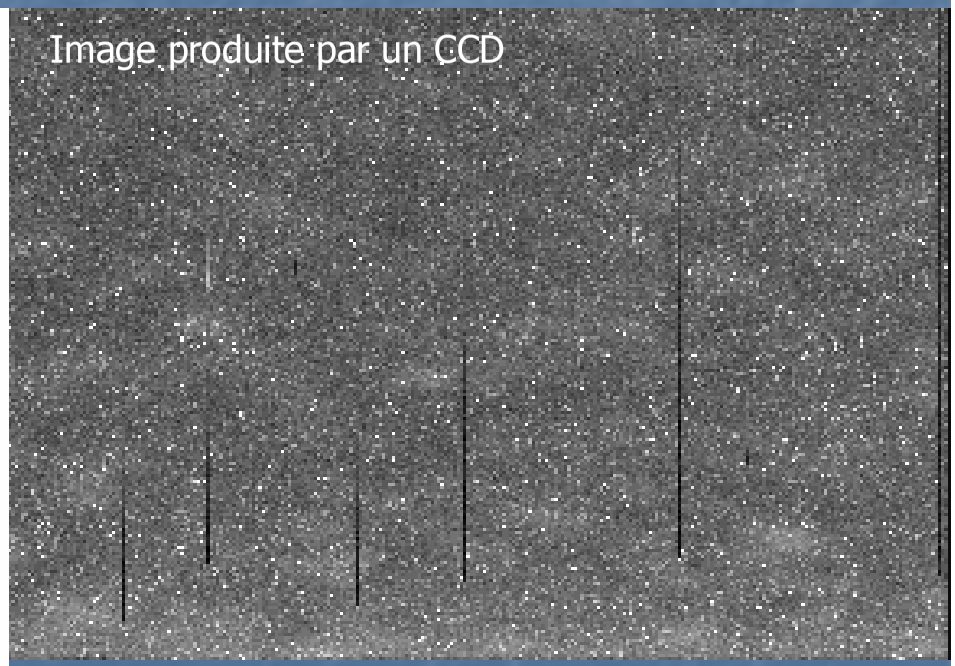
Qualité cosmétique des grands CCD !

Grade cosmétique des CCDs

-Défauts cosmétiques
- pixel non sensible, ou déviant
- pixel chaud
- Amas de pixels chauds, déviants ou morts
- Colonnes mortes
- Traps

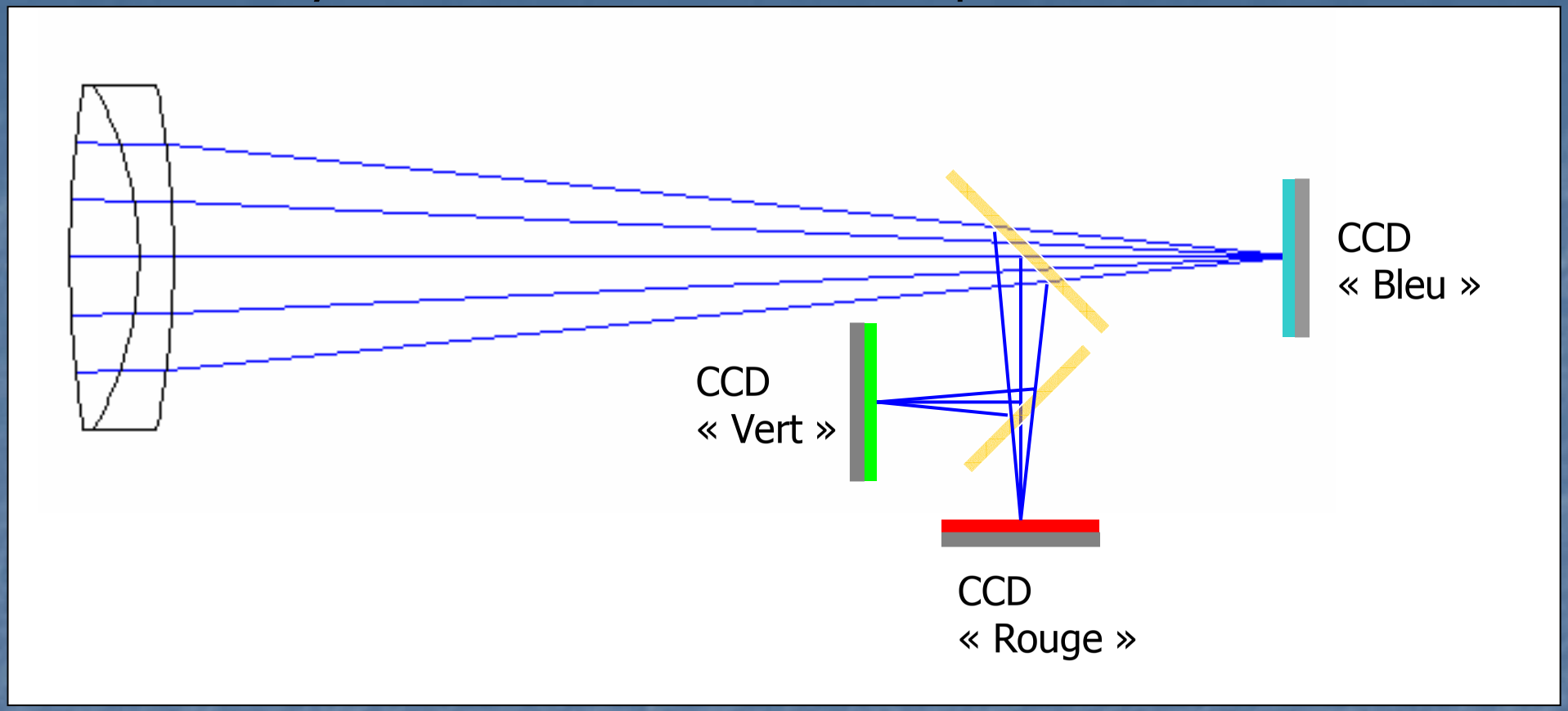
Class	Point Defects		Cluster Defects		Column Defects	
	Total	Zone A	Total	Zone A	Total	Zone A
C1	≤5	≤2	0	0	0	0
C2	≤10	≤5	≤4	≤2	0	0
C3	≤20	≤10	≤8	≤4	≤4	2





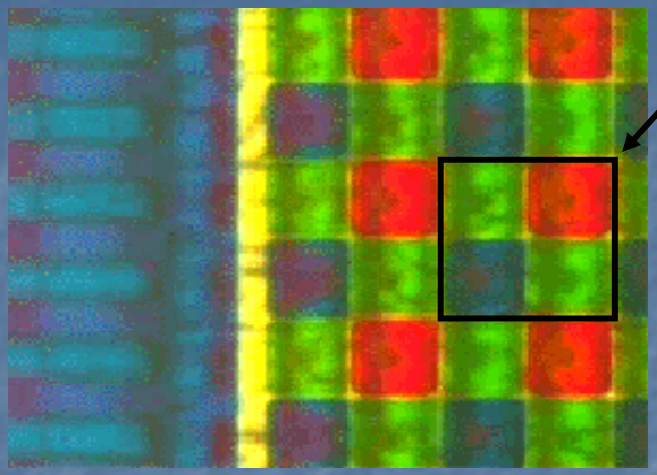
Traps

Systèmes Tri-CCD : cameras professionnelles

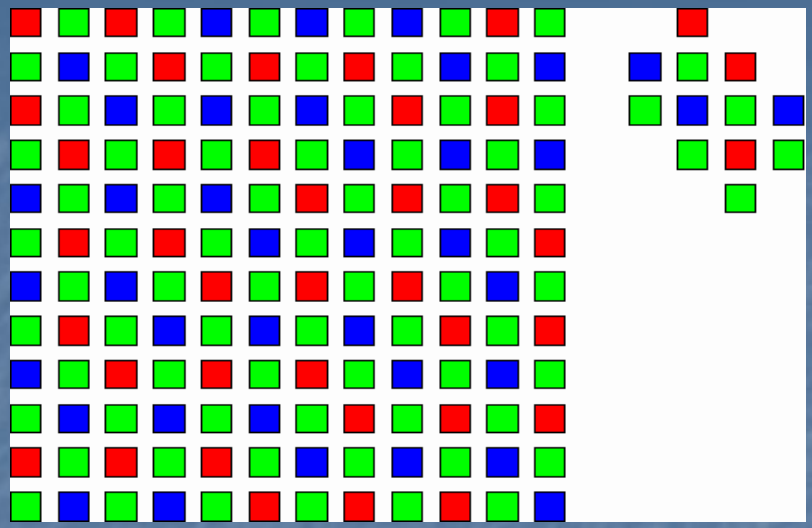


- 2 lames dichroïques (séparation B-RG et R-G)
- Alignement pixel-pixel critique si on ne veut pas re-échantillonner
- 3 CCD de même résolution
- Système le plus parfait, mais le plus cher et encombrant.

Formation de la couleur

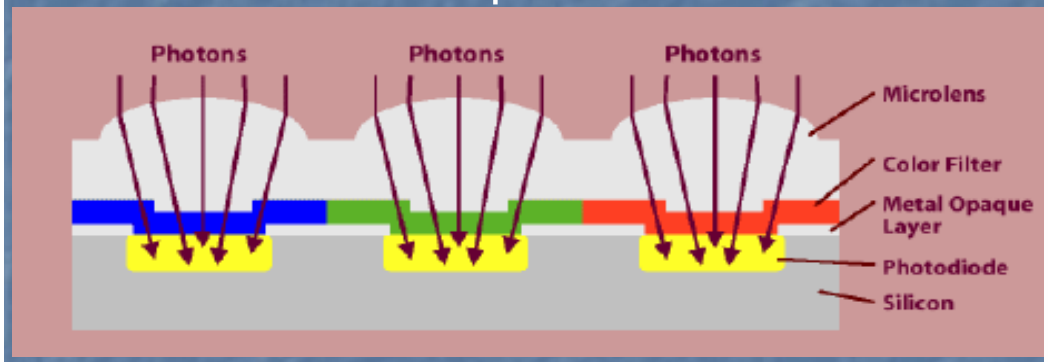


Motif Bayer

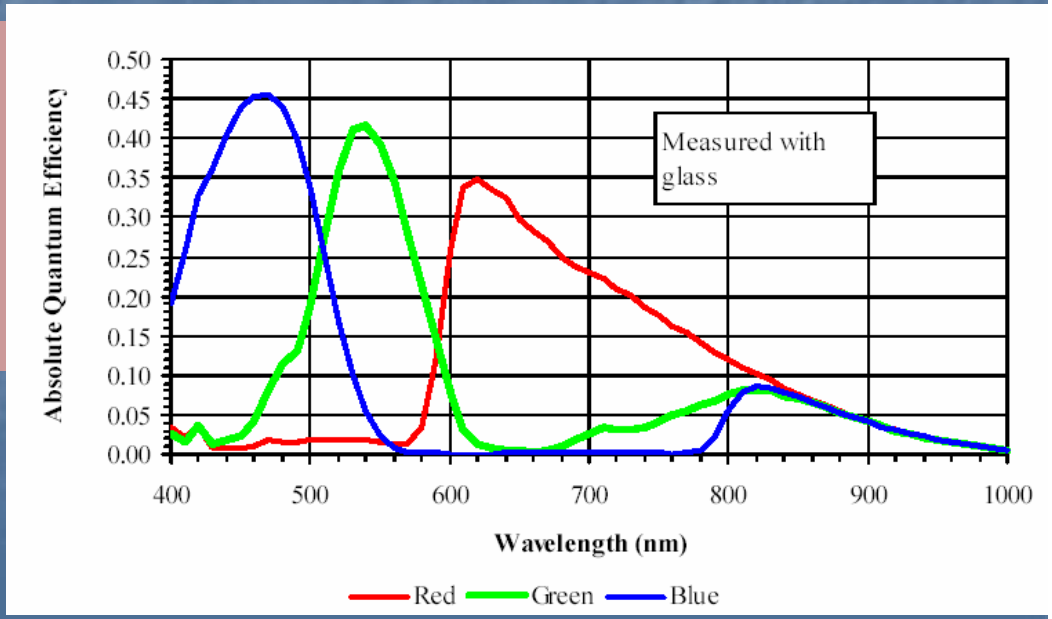


Matrice de Filtres accolés au pixels
Faire mieux = beam splitter + 3 CCDs

Motif pseudo Bayer RGB / CMY

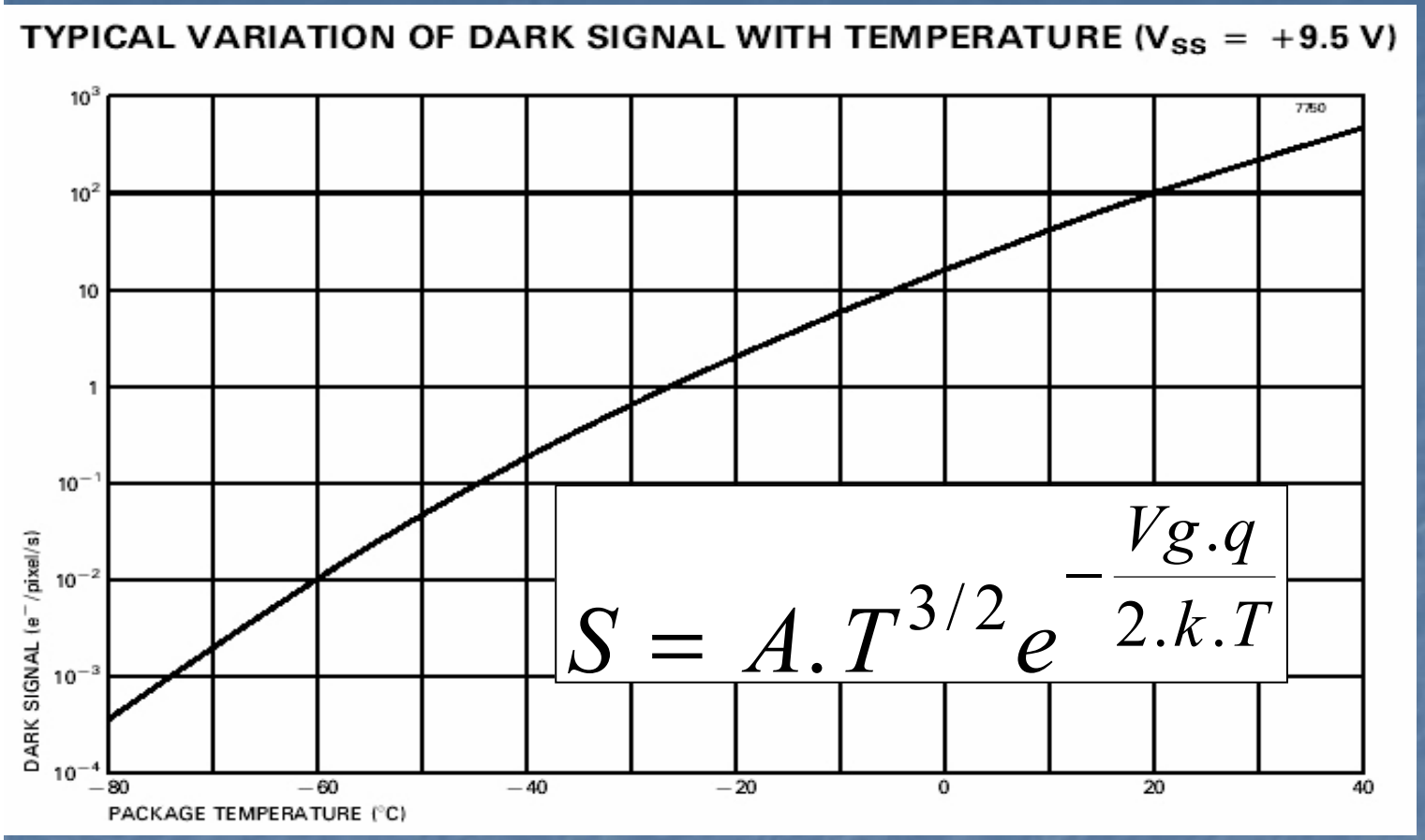


Matrice de filtres + microlentilles



Interpolation logicielle des 3 plans RGB

Limitation des CCD : Courant d'obscurité



A : Constante dépendante des unités utilisées (LSB,e-/pixel/sec,pA/cm²)

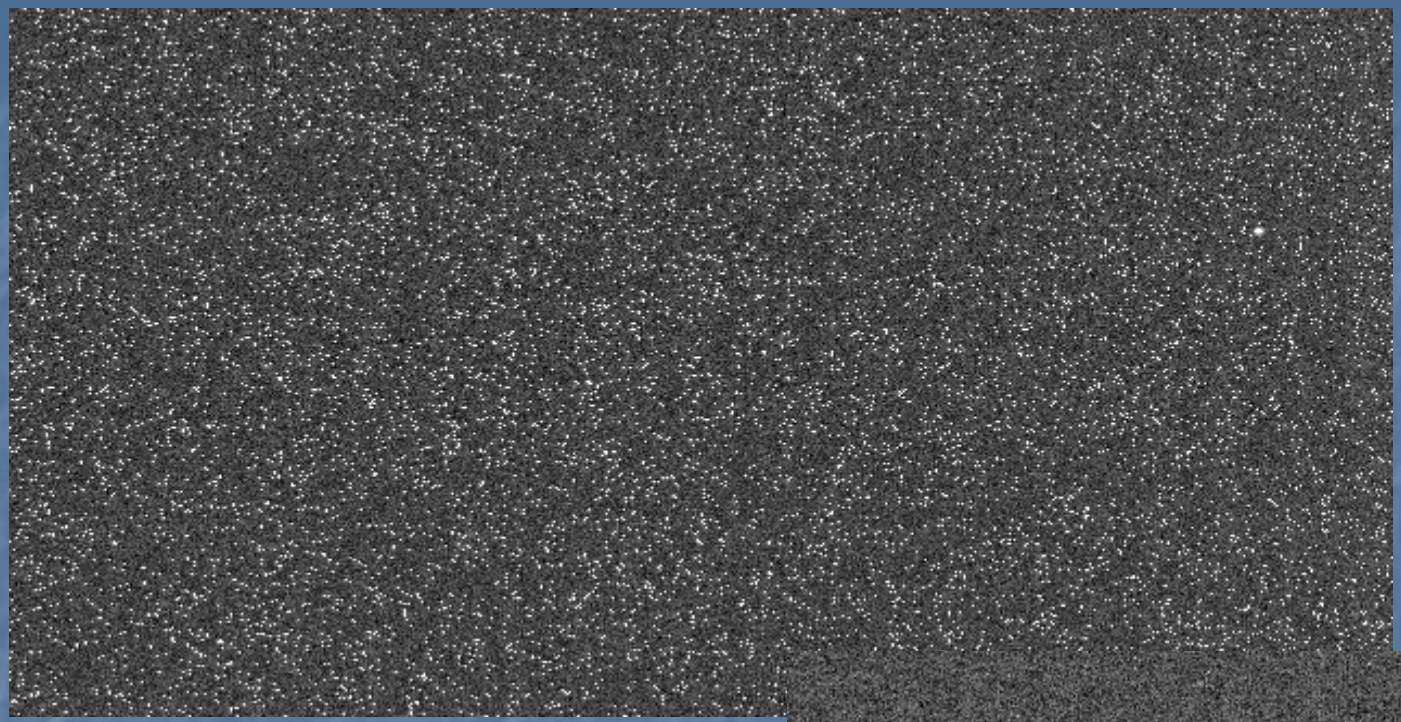
Vg : Tension de Gap (Bande interdite)

kT : Produit constante de Boltzmann par la température.

q: Charge de l'électron

- Fortement dépendant de la température, proportionnel au temps de pose
- Un signal supplémentaire, affecté d'un bruit de Poisson
- Exprimé en pA/cm² ou en e-/pixel/Seconde
- Règle de décroissance : Facteur 2 tout les 5 à 7°C

Limitation des CCD : Courant d'obscurité



180 sec (-15°C)

- Non uniformité
Pixel – pixel du courant d'obscurité
- Points chauds

100 – 5 pA/cm² à 20°C

Formule de passage

$$Id = \frac{10^{20}.E.q}{S}$$

Id : courant en pA/cm²
q :charge de l'électron
S: surface du pixel en µm²
E: courant d'obscurité en e-/pixel/sec

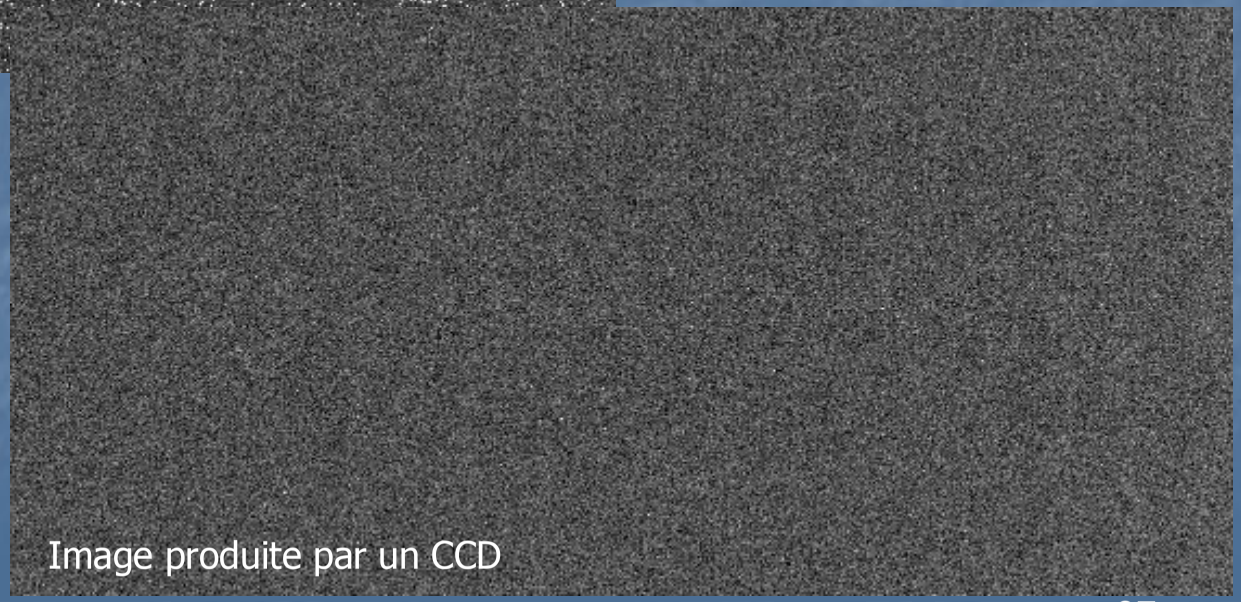
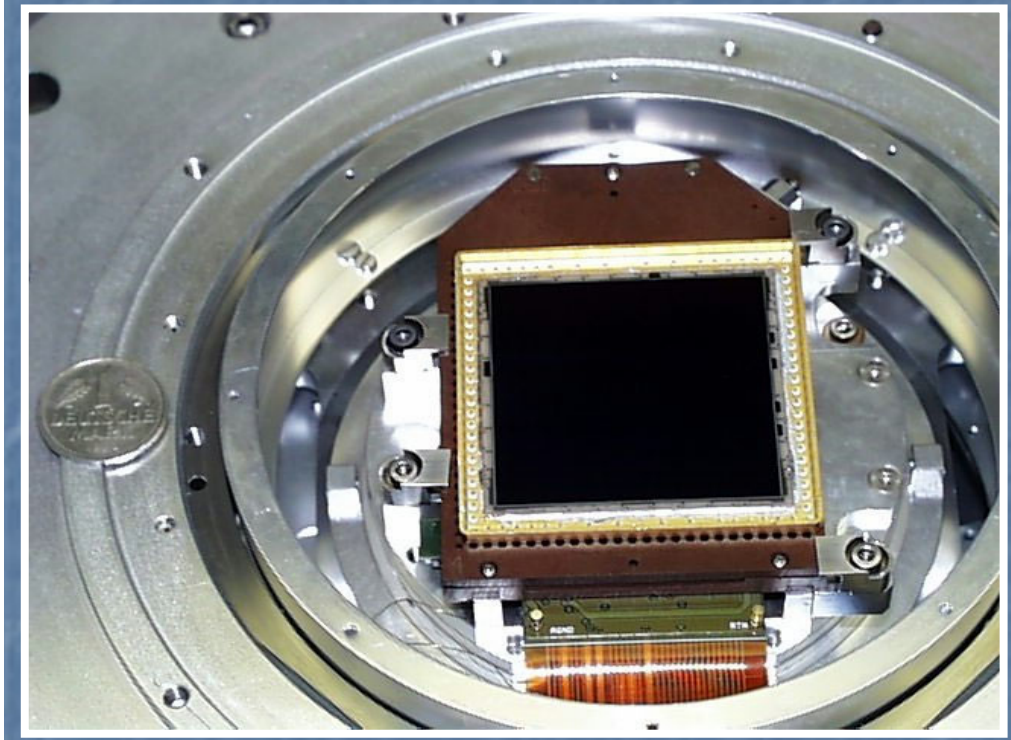
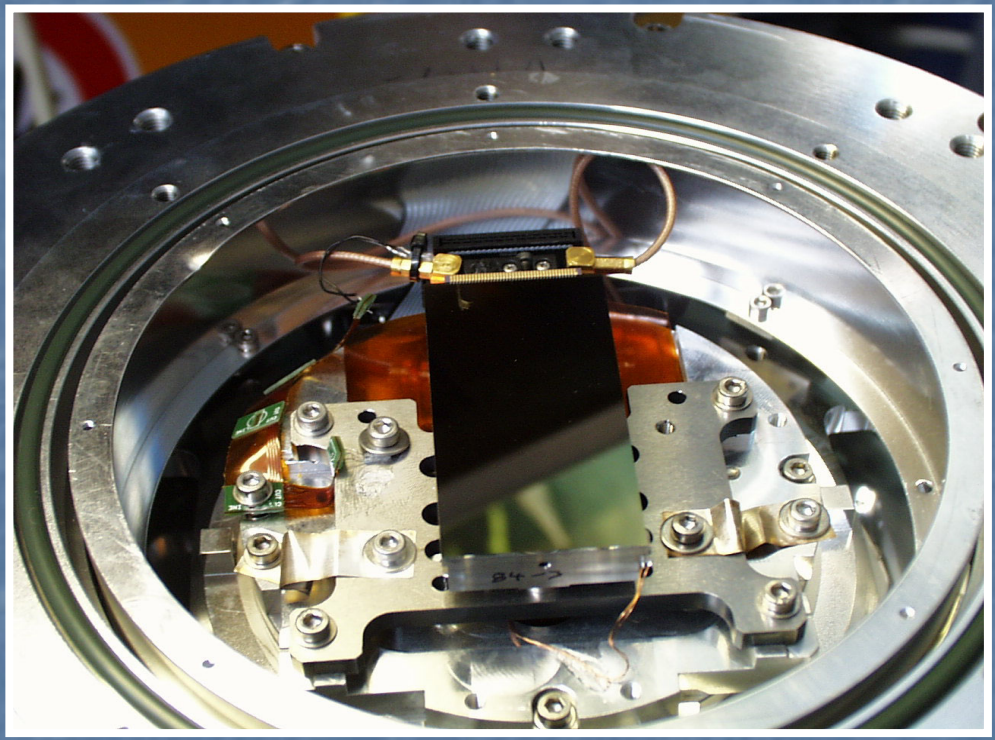


Image produite par un CCD

10 msec

Courant d'obscurité : refroidir

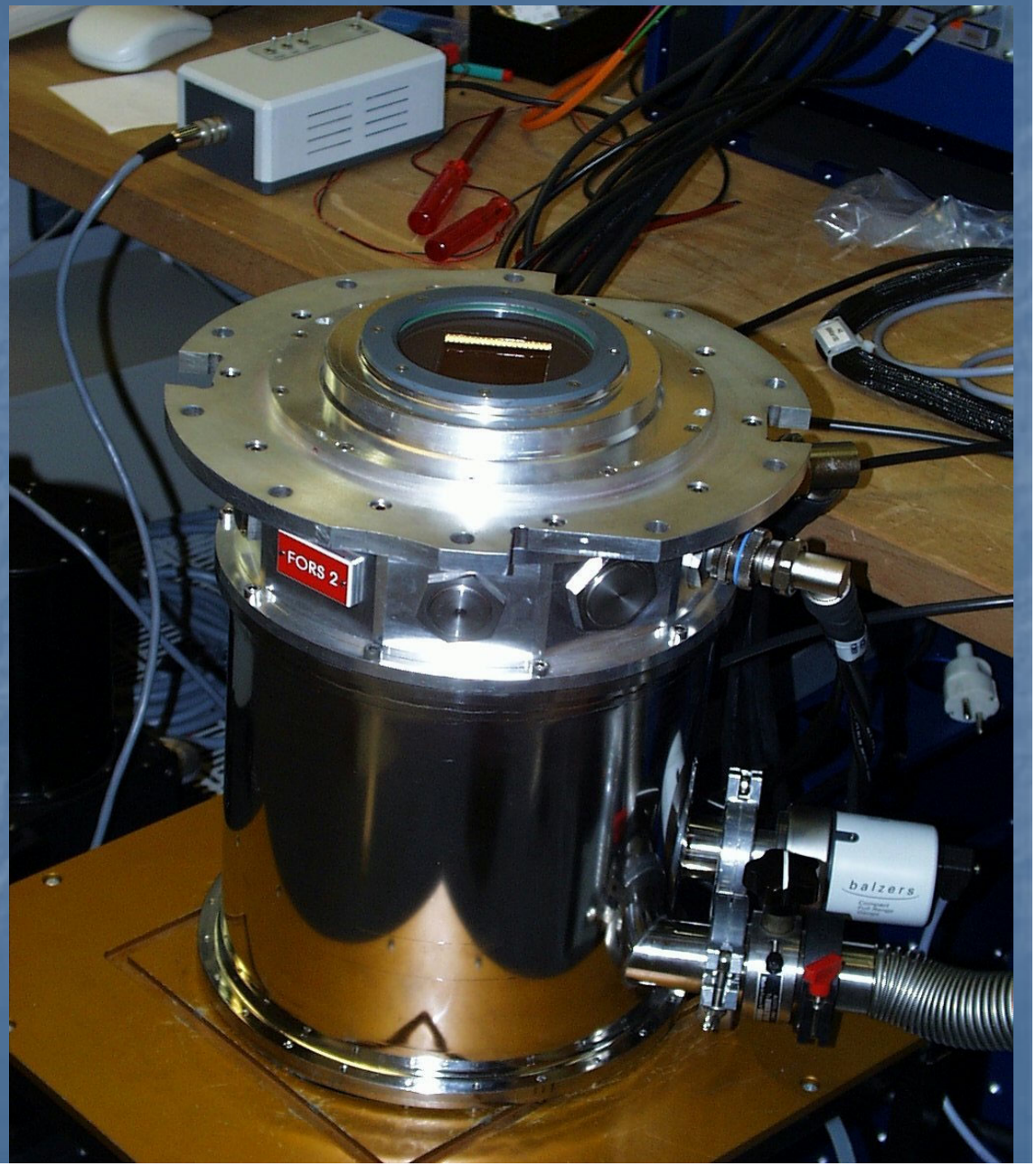




CCD dans un cryostat

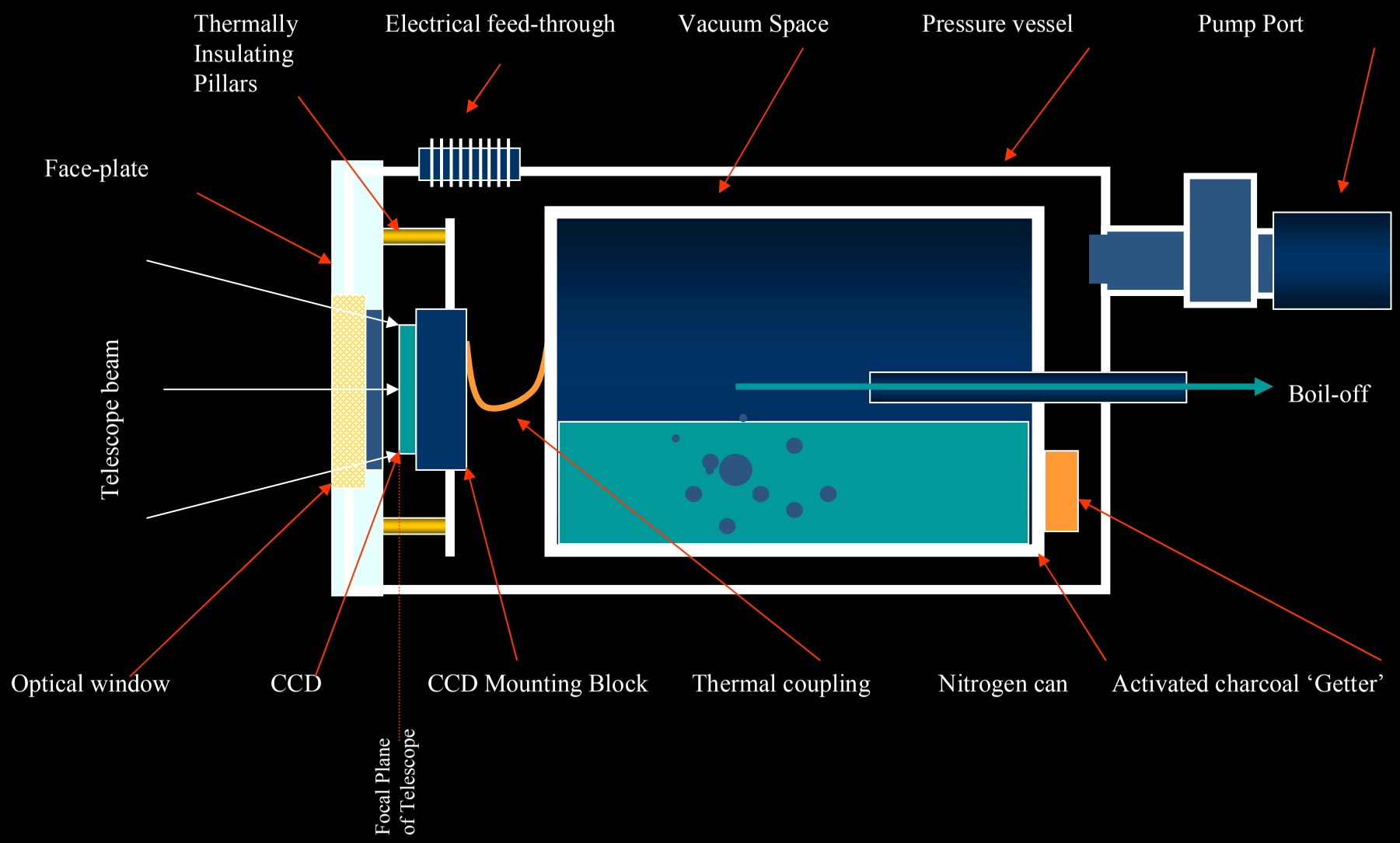
Courant d'obscurité : refroidir à l'azote liquide

- Doit être capable de refroidir le/les CCD à -120°C
- Autonomie de 48h
- vide de $6x10^{-6}$ mB
- Applications scientifiques



Cryostat classique à bain d'azote liquide

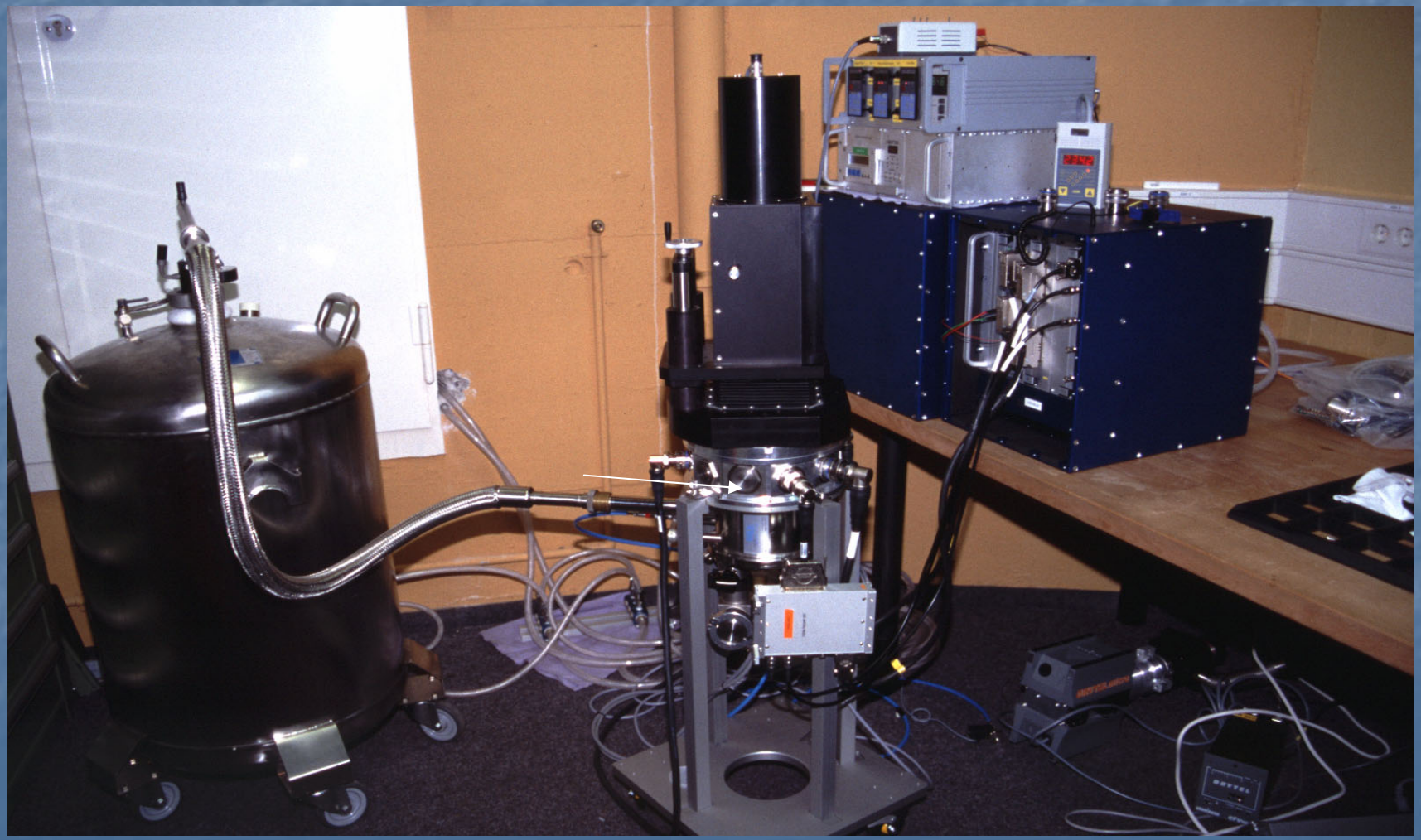
Courant d'obscurité : refroidir à l'azote liquide



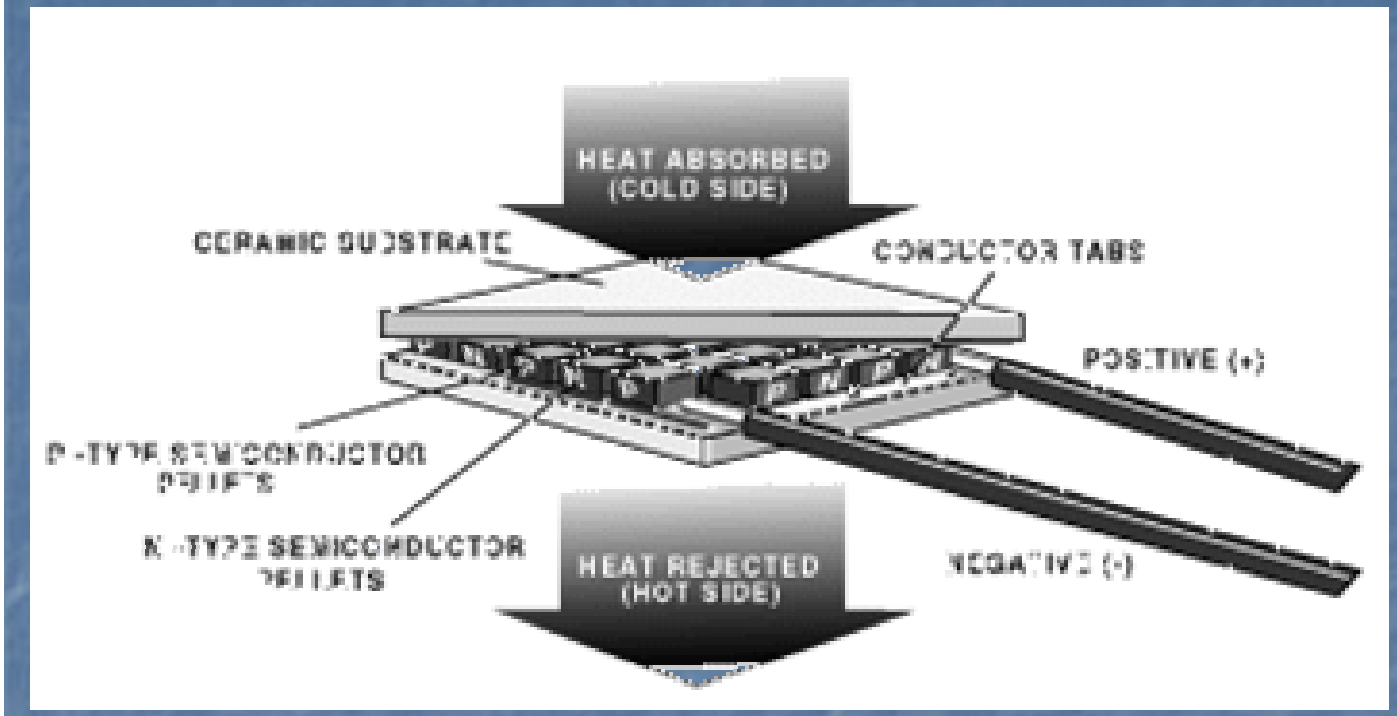
Refroidissement LN²

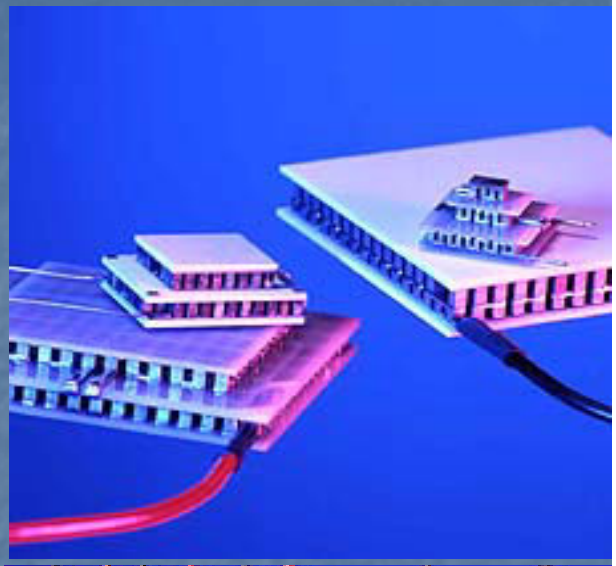
Cryostat à flux continu d'Azote liquide

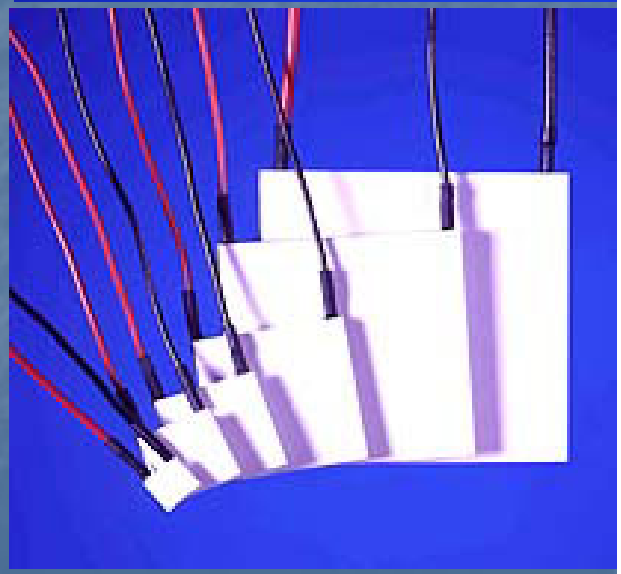
- Autonomie de 7 jours
- Adapté aux instruments sur fixe (spectrographe...)
- très compact, refroidissement très rapide



Refroidissement Détecteurs Modules Peltiers

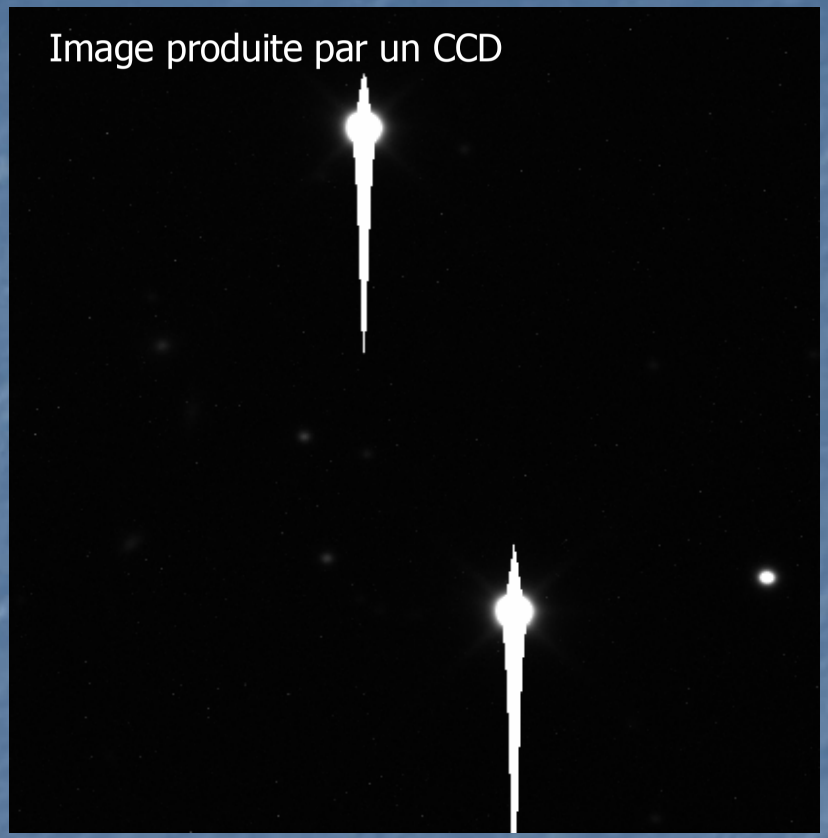




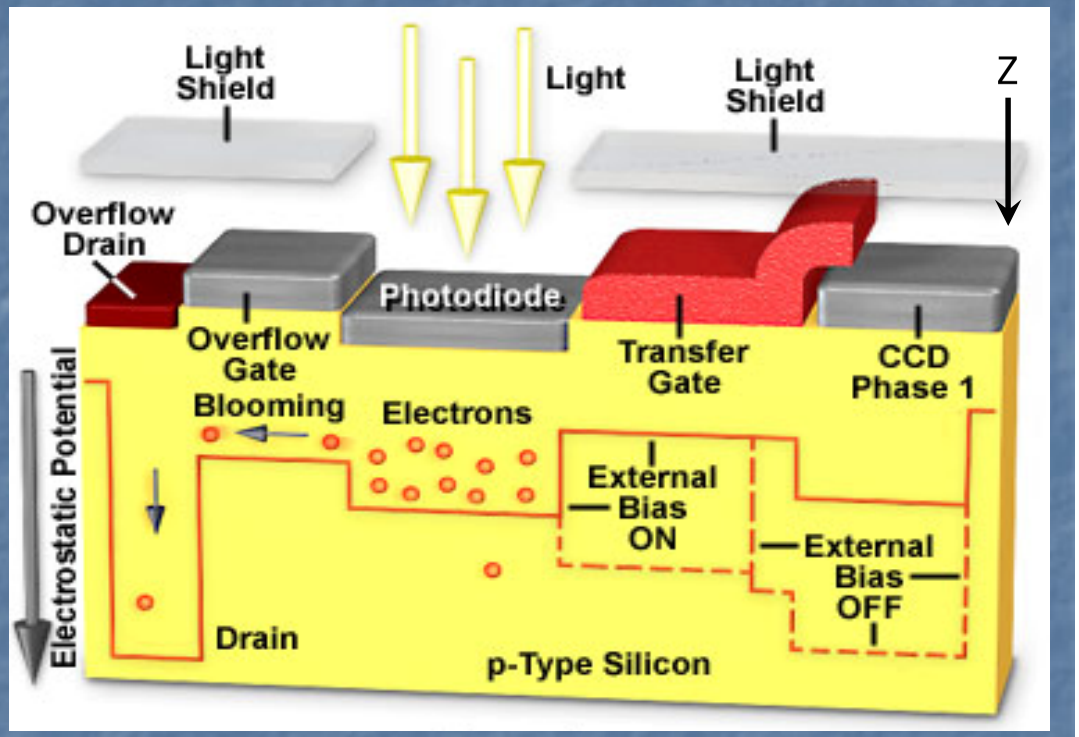


- Passage d'un courant = pompe à chaleur
- Compact et efficace jusqu'à des ΔT de 50°C
- Utilisé pour la régulation thermique des détecteurs
- Existe sous forme intégrée avec le détecteur « Peltier package »
- Economique

Drain anti-éblouissement : *anti-blooming*



Problème :
Image de 2 spots, très brillants
où Q = 10 Qsat



- Très efficace
- Pas de blooming jusqu'à : Q = 1000 Qsat
- Mais baisse de rendement quantique

PRNU (Photo Response Non Uniformity): Uniformité de réponse spatiale pixel-pixel

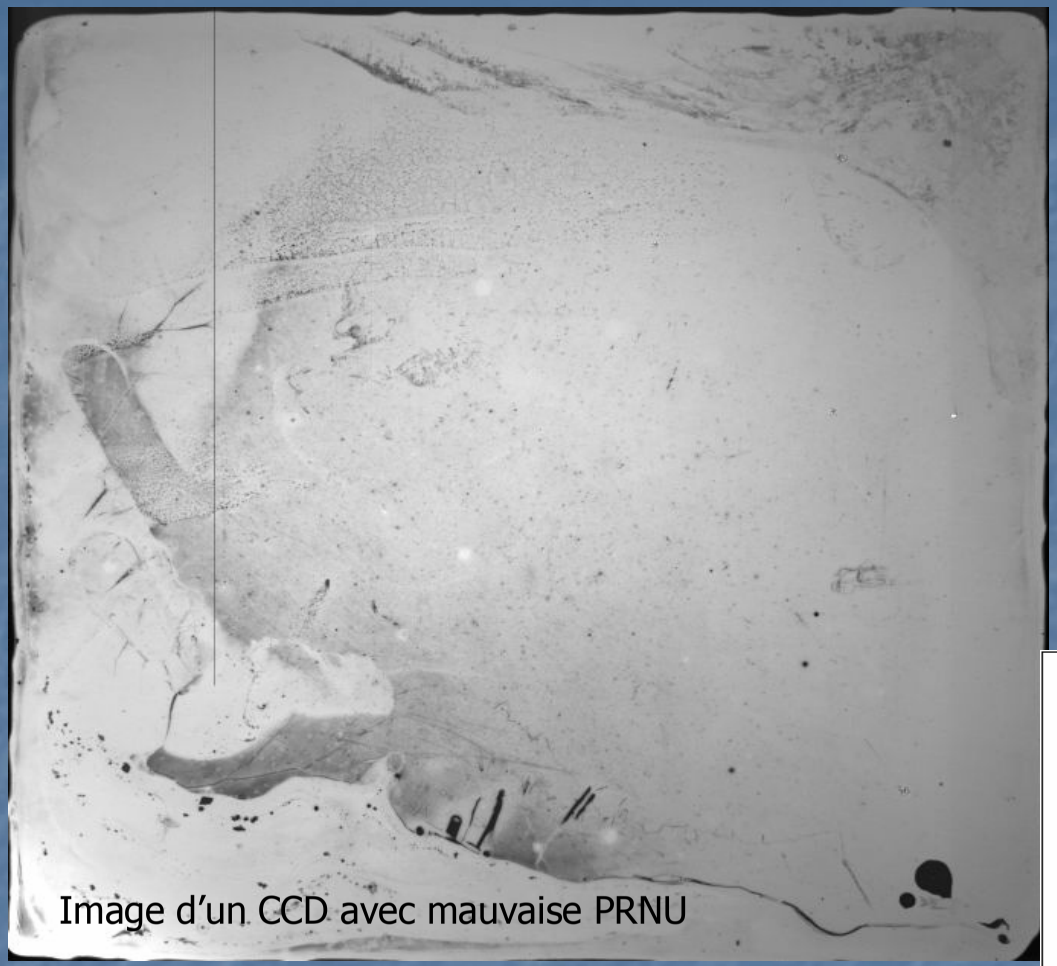
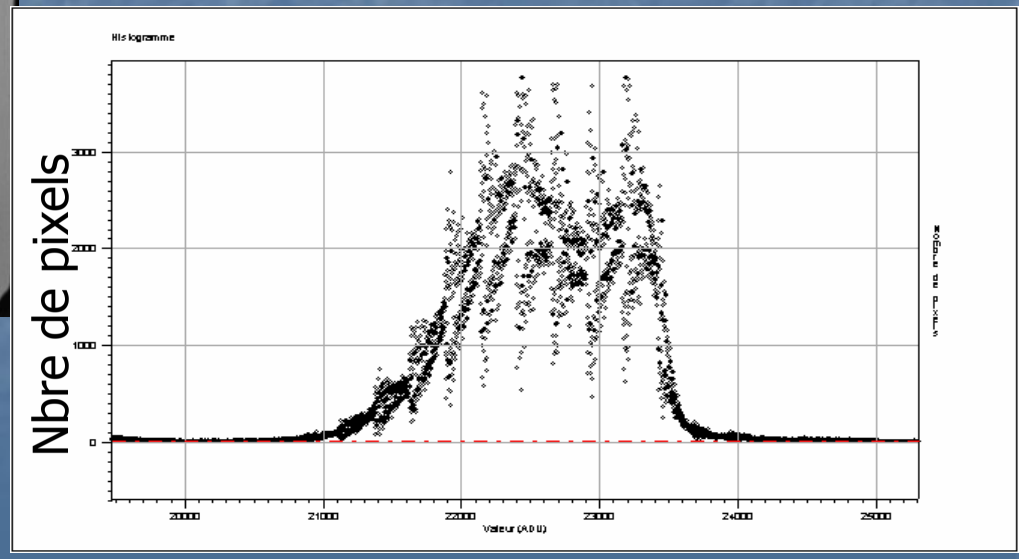


Image d'un CCD avec mauvaise PRNU

Image d'un CCD parfait, limité par le bruit de photons

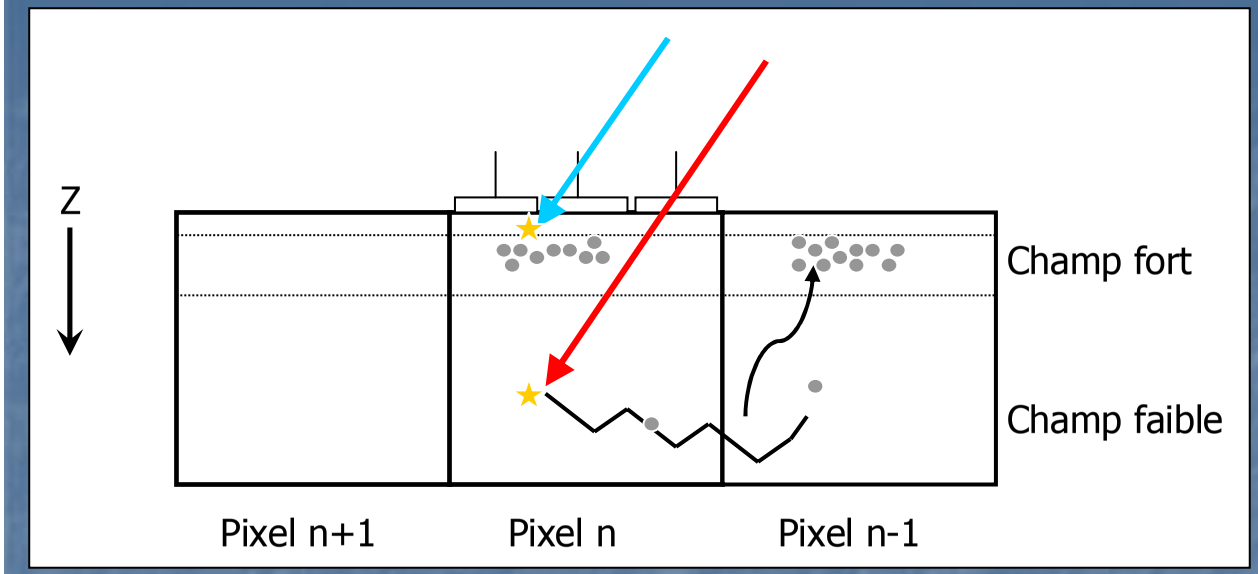


Intensité

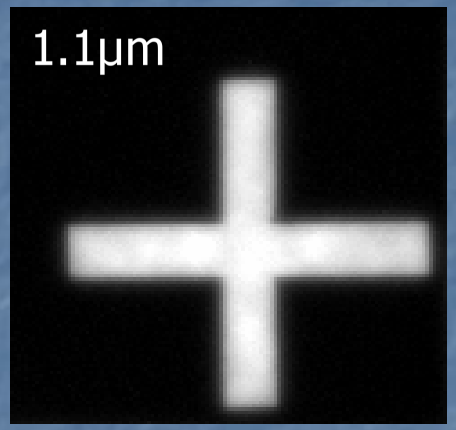
$$PRNU=(Max_{95\%}+min_{5\%})/(Max_{95\%}-Min_{5\%})$$

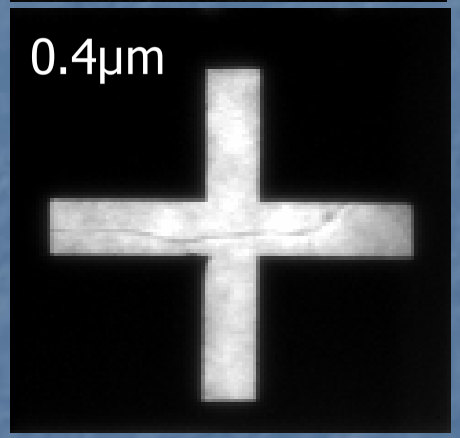
-De l'ordre de qq %
- Variable avec λ

Pollution pixel - pixels : *Crosstalk*



Effet : sur la netteté ou la FTM des images





Spectralement dépendant

$$FTM_{diff}(f,\lambda) = \frac{1 - \dfrac{e^{-\alpha(\lambda).Xd}}{1+\alpha.L_k(f)}}{1 - \dfrac{e^{-\alpha(\lambda).Xd}}{1+\alpha.L_n}}$$

$$L_k(f) = \sqrt{\frac{1}{\dfrac{1}{L_n^{\,2}} + (2\pi.f)^2}}$$

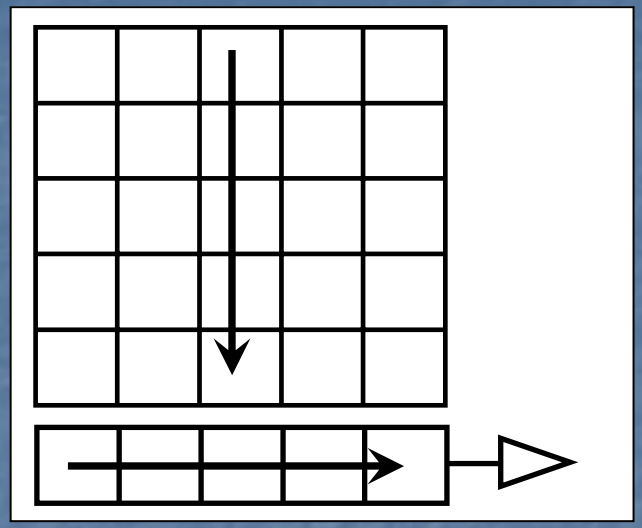
Xd : profondeur de la zone dépeuplée
f : la fréquence spatiale pl/mm.
Ln : est la longueur (µm) de diffusion des électrons dans le silicium.
$\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption du silicium (μm^{-1})

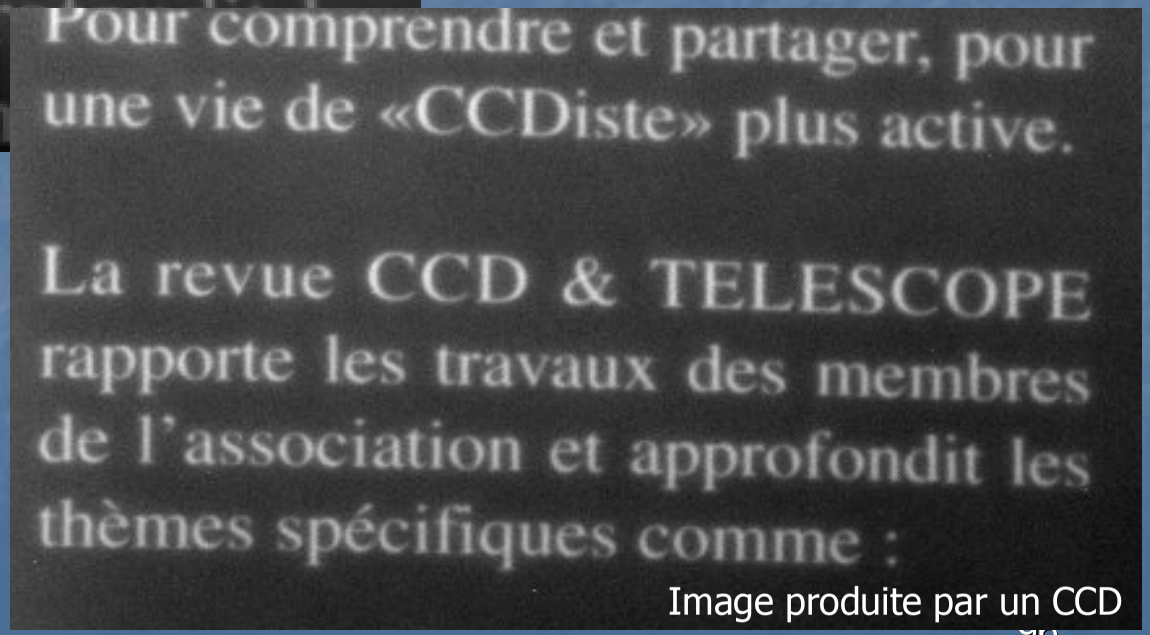
- Pénétration des photons Bleus sur qq nm
- Pénétration des photons Rouges sur plusieurs µm
- Diffusion des photo électrons
- FTM en Sinc si $\lambda < 0.5$ µm

Smearing (lecture et intégration)

Caméra sans obturateur
Lecture + integration combinée

Full Frame





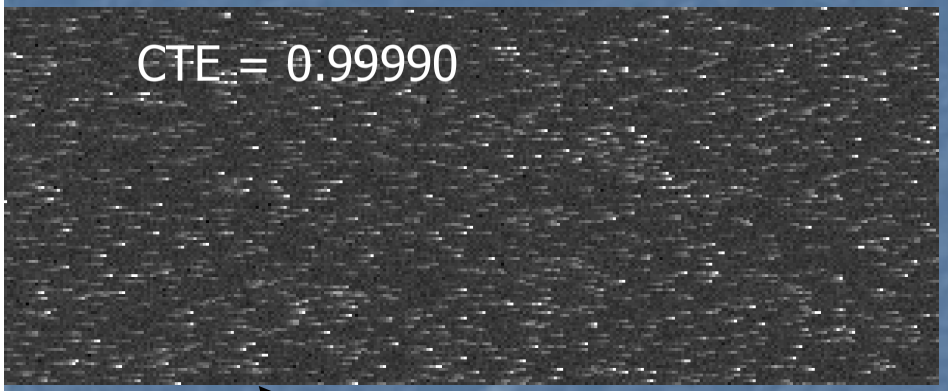
Caméra avec obturateur

Image produite par un CCD

Les photons n'illuminent plus les pixels pd la lecture

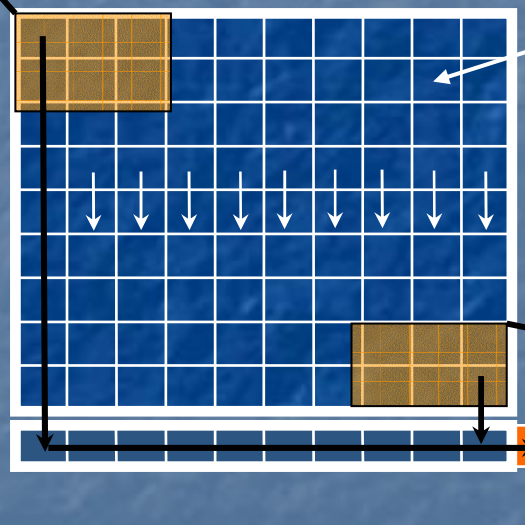
CTE : Charge transfer efficiency

- D'un pixel à l'autre l'efficacité de transfert n'est pas de 1 mais tjrs < 1
- Perte de charges sur le pixel suivant, image floue



CTE Horizontal <> CTE vertical

-Plus critique en transfert horizontal car transferts plus rapides
-Variable dans l'image, car le nombre de transfer varie dans l'image.



Ex :
CTE = 0.99999 , 4096 transfert : 95.9%
CTE = 0.999999, 4096 transfert : 99.5%

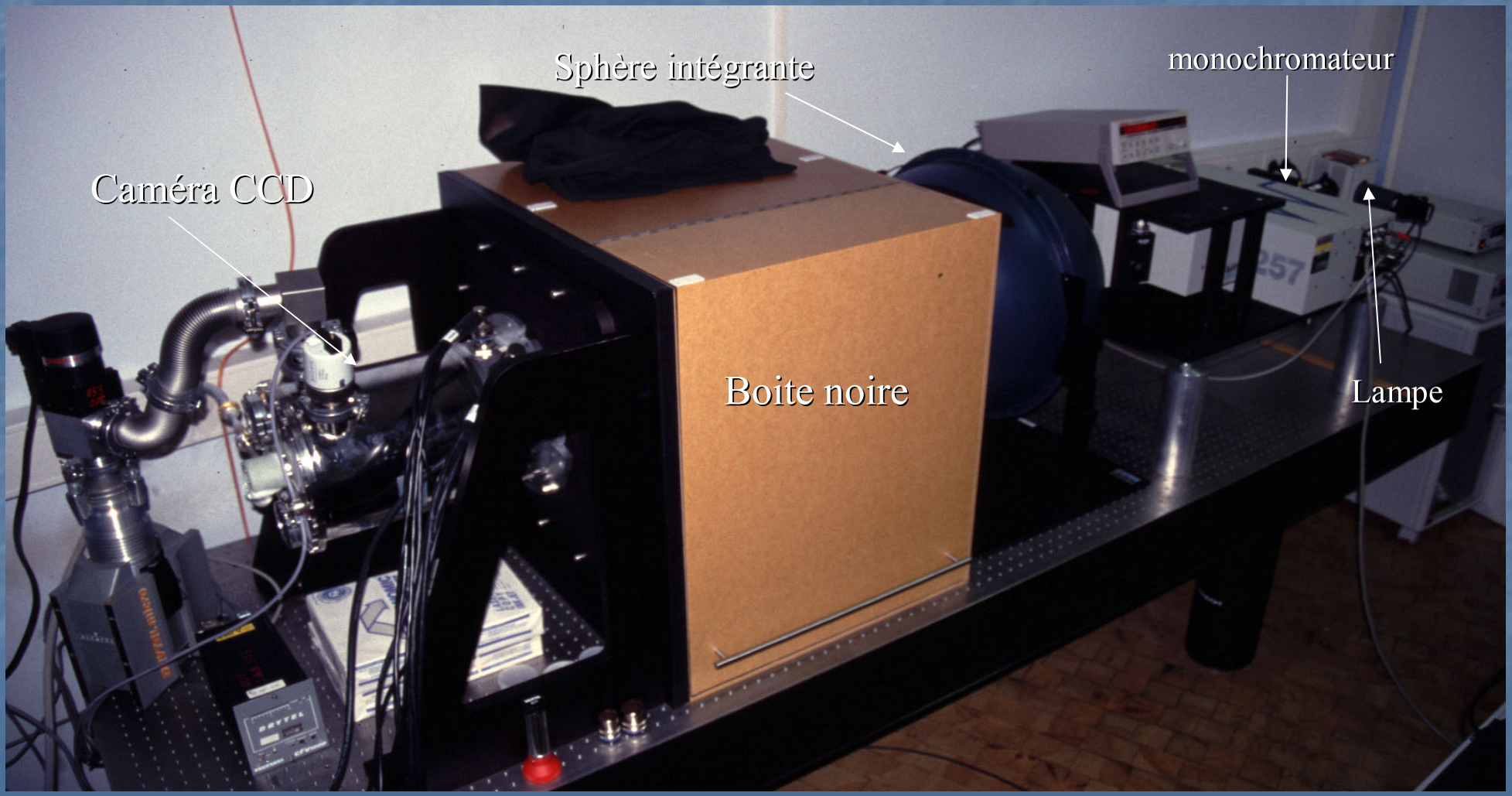
Un problème pour les grands CCDs

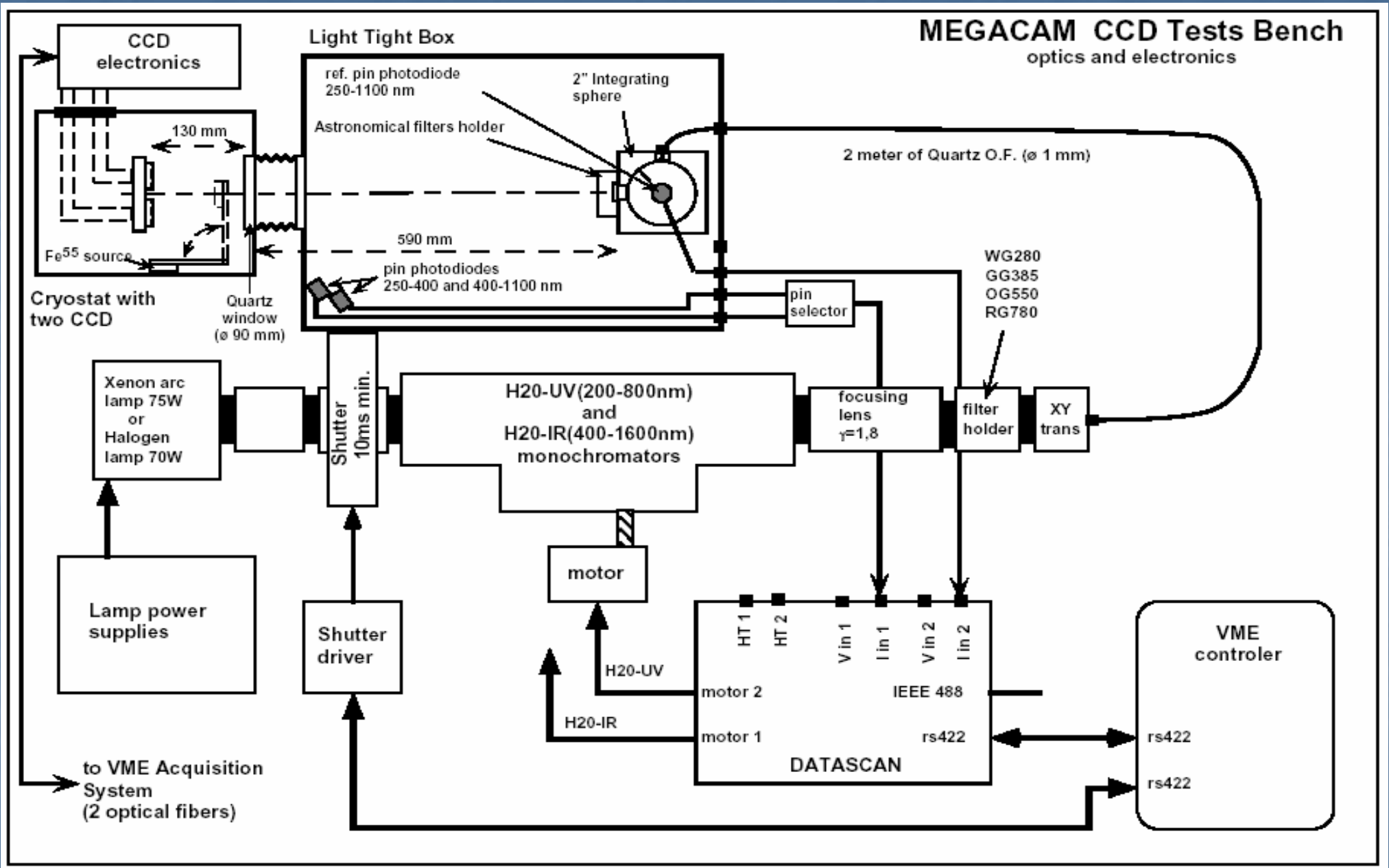
Paramètres important dans un CCD et leur caractérisation

- Taille de pixels et leur nombre : aspect ratio, optique associée
- Rendement quantique (domaine spectral retenu)
- Fill Factor
- Qualité cosmétique (défauts de pixels, colonnes)
- Bruit de lecture (critique si peu de photons)
- Courant d'obscurité (critique si Tint > 1s)
- Linéarité (critique pour applis scientifiques)
- Dynamique (12, 14, 16 bits)
- Vitesse de lecture (critique pour du temps réel)
- Architecture du CCD (full frame … obturateur ou pas)
- CCD couleur ou N&B
- Anti blooming

- Efficacité de transfert de charges
- Possibilité de binning ou pas
- Facilité de mise en œuvre : nbre de phase, de pins, tensions
- Nombre de sorties

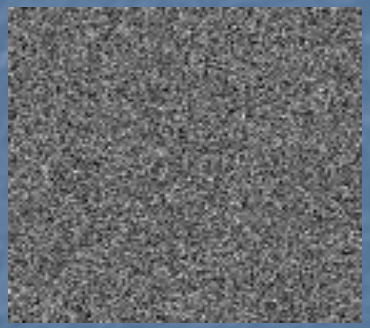
Un banc de test de CCD et de leur caractérisation




MEGACAM CCD Tests Bench
optics and electronics
CCD electronics
Light Tight Box
ref. pin photodiode 250-1100 nm
2" Integrating sphere
Astronomical filters holder
130 mm
2 meter of Quartz O.F. (ø 1 mm)
590 mm
Fe55 source
pin photodiodes 250-400 and 400-1100 nm
Cryostat with two CCD
Quartz window (ø 90 mm)
pin selector
WG280
GG385
OG550
RG780
Xenon arc lamp 75W or Halogen lamp 70W
Shutter 10ms min.
H20-UV(200-800nm) and H20-IR(400-1600nm) monochromators
focusing lens γ=1,8
filter holder
XY trans
motor
Lamp power supplies
Shutter driver
HT 1
HT 2
V in 1
I in 1
V in 2
I in 2
H20-UV
H20-IR
motor 2
motor 1
IEEE 488
rs422
DATASCAN
VME controler
rs422
rs422
to VME Acquisition System (2 optical fibers)

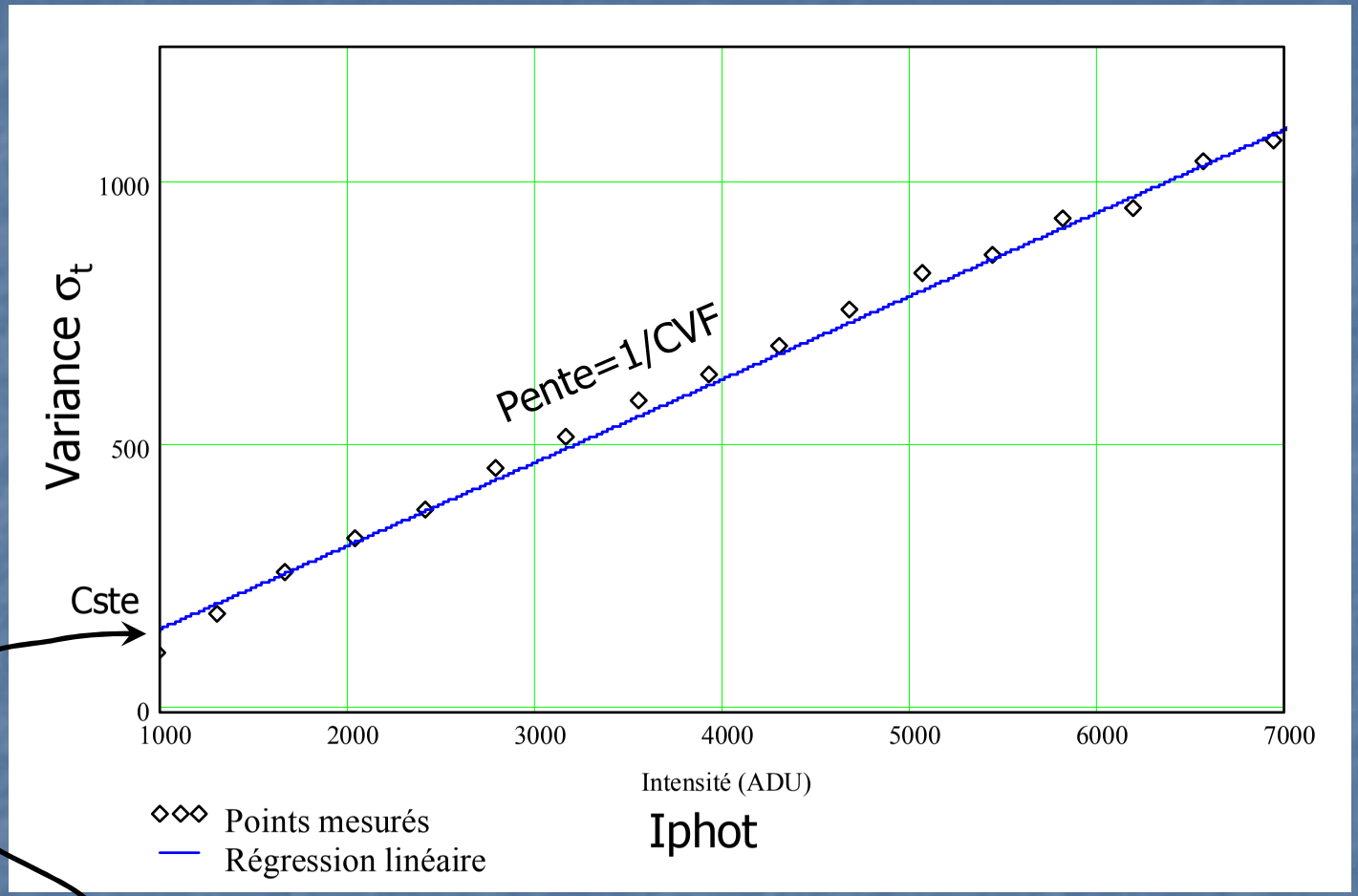
Courbe de transfert photonique « *Photonic transfer curve* » : *Facteur de conversion (CVF)*

Zone de l'image
Numérisé en ADU



- Différentes illuminations
- Calcul moyenne
- Calcul de la variance
- ADU : analog to digital Unit

$$ADU \propto Volts$$

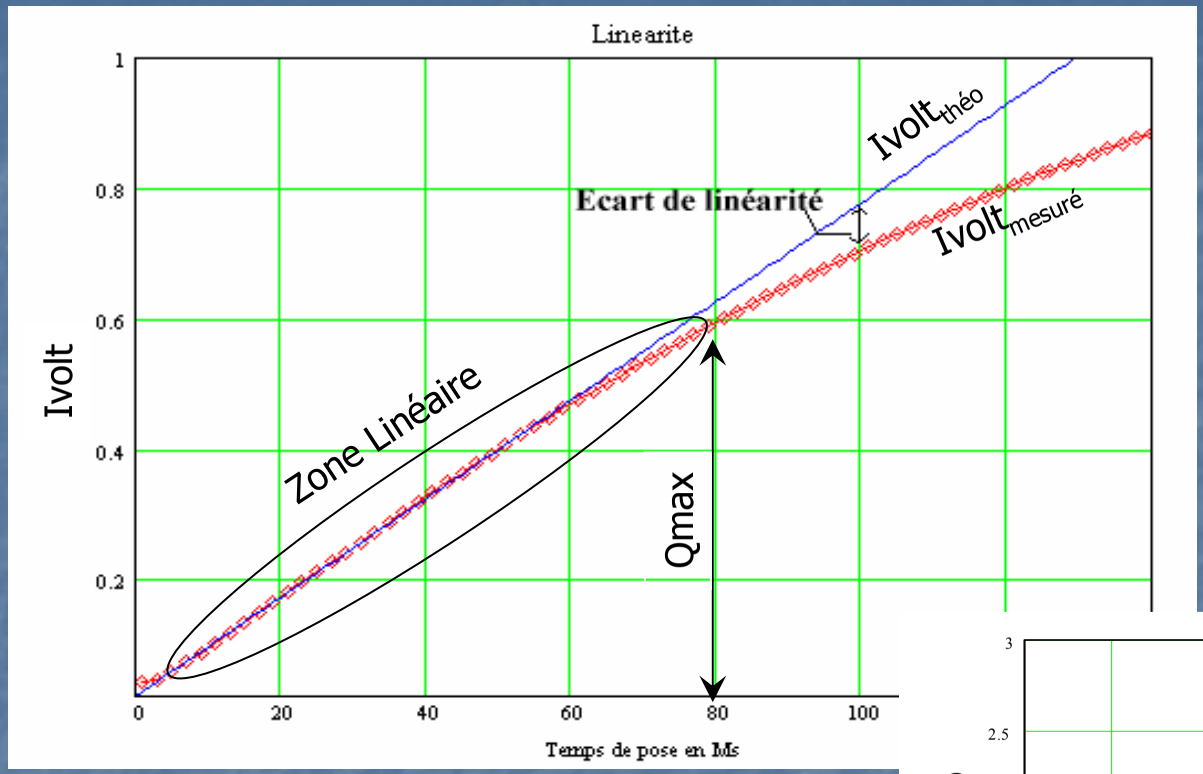


$$\sigma_t = \frac{1}{CVF} Iphot + \frac{1}{CVF^2} . \sigma_{lec}^2$$

CVF en µV/e-, LSB/e- ou ADU/e-

Typ. 30µV/e- à 1.5µV/e-

Linéarité de réponse et dynamique



Dynamique

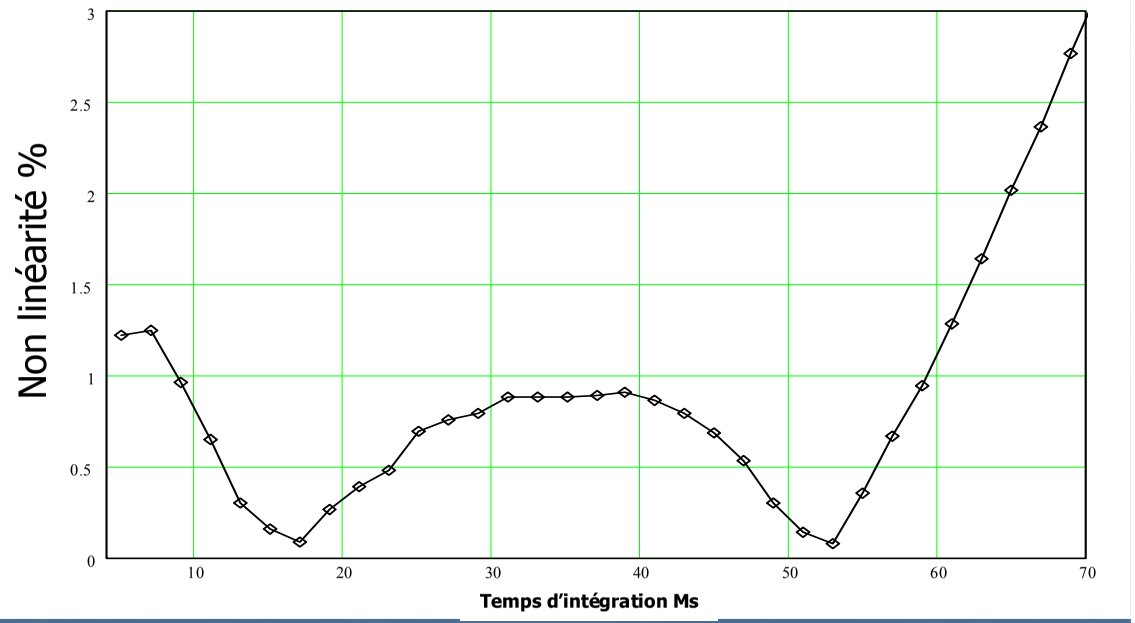
$$D(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{Q_{\max}}{\sigma_{lec}}\right)$$

$$D(Bits) = \ln\left(\frac{Q_{\max}}{\sigma_{lec}}\right) / \ln(2)$$

Non linéarité

$$NL\%(t_{\text{int}}) = \frac{\left|Ivolt_{mes}(t_{\text{int}}) - Ivolt_{théo}(t_{\text{int}})\right| * 100}{Ivolt_{théo}(t_{\text{int}})}$$

- Mesure de la tension de sortie $Ivolt_{mes}$ du détecteur en fonction de l'éclairement ou du temps d'intégration t_{int}
- le bruit de lecture doit être connu σ_{lec}
- Conditionne la dynamique du détecteur
- Linéarité est un paramètre critique dans les applis scientifique



Performances CCD scientifiques/standards

Bruit

- Scientifique (sc) :
  - 2 e^- à 100Kpx/s (40s) bien adapté à des applications spectro.
  - 5.8e^- à 625Kpx/s (7s) bien adapté à l'imagerie
- Autre :
  - 30 a 50 e- à plusieurs MegaPixels

Courant d 'obscurité :

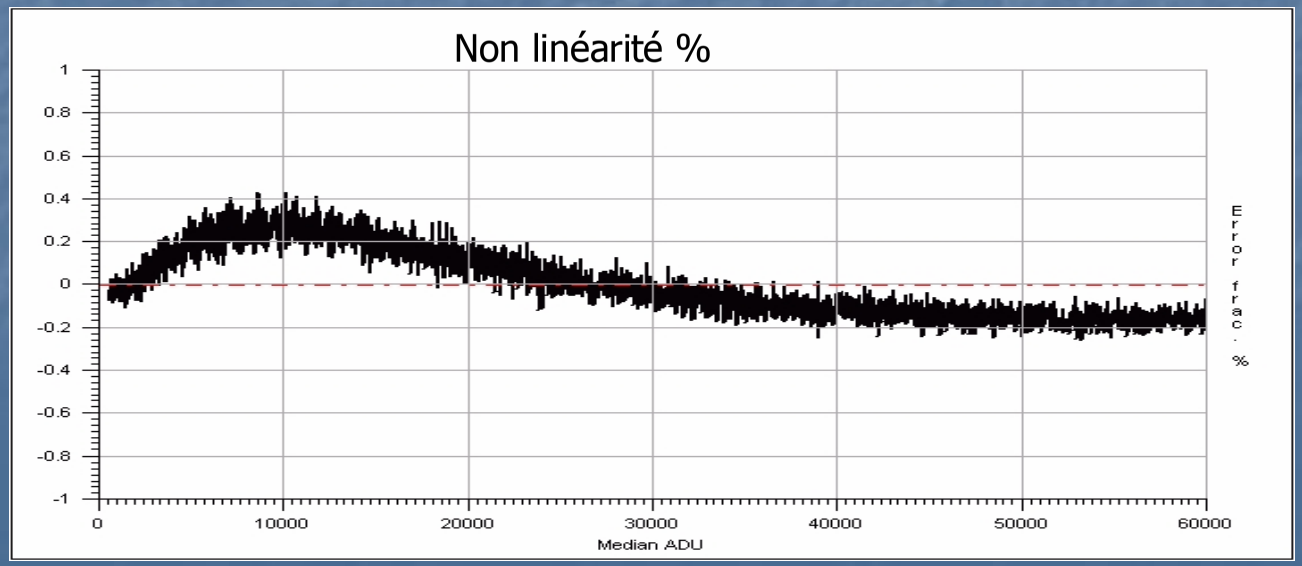
- sc : qq e^- /pixel/heure à -120°C
- autre : 10 e-/pixel/sec

Efficacité **de Transfert de charges : CTE**

- sc : Toujours > 0.9999995
- autre : 0.999995

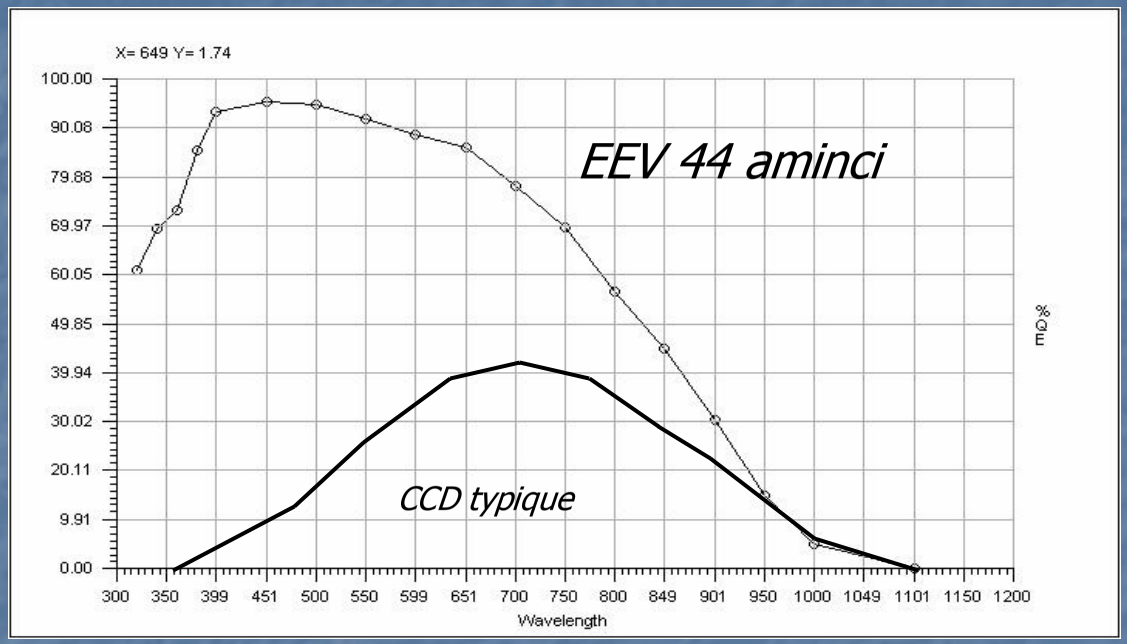
Non Linéarité :

- sc : < 1%
- autre : 5-10%



Performances

Rendement quantique d'un CCD

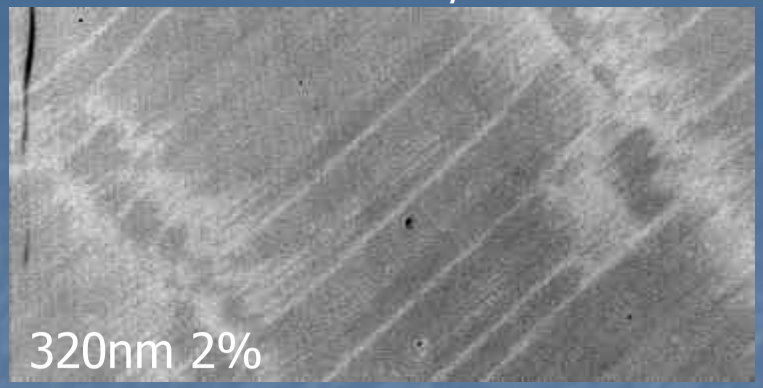


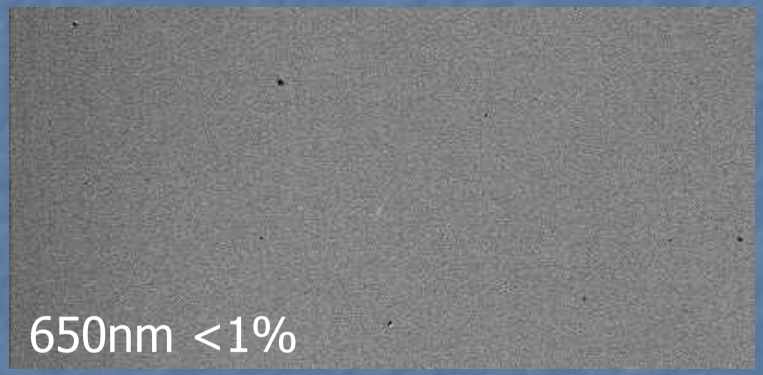
- Mesure très difficile
- Photodiode calibré en rendement absolu
- Nombreuses erreurs possibles

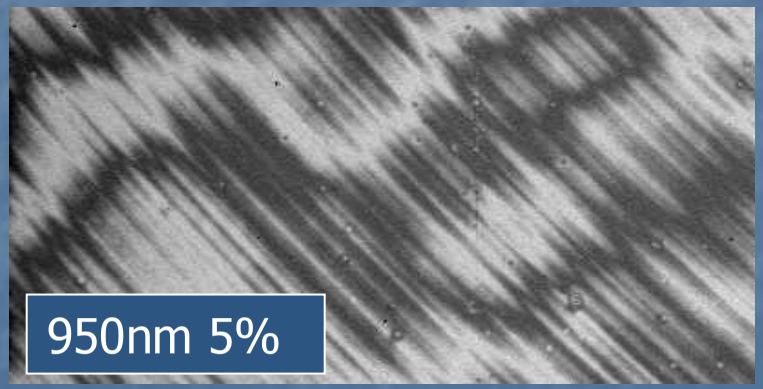
$$QE(\lambda) = \frac{\dfrac{Median(I\lambda(X_1,Y_1,X_2,Y_2) - Bias(X_1,Y_1,X_2,Y_2)) * CVF}{Tex}}{Photons(\lambda) * \dfrac{DiodeFluxMeas(\lambda)}{DiodeFluxCalibration(\lambda)} * \dfrac{Pix^2}{100} * Window(\lambda)} * 100$$

Formule de calcul de QE à partir de données expérimentales

PRNU : uniformité de réponse en fcto de λ



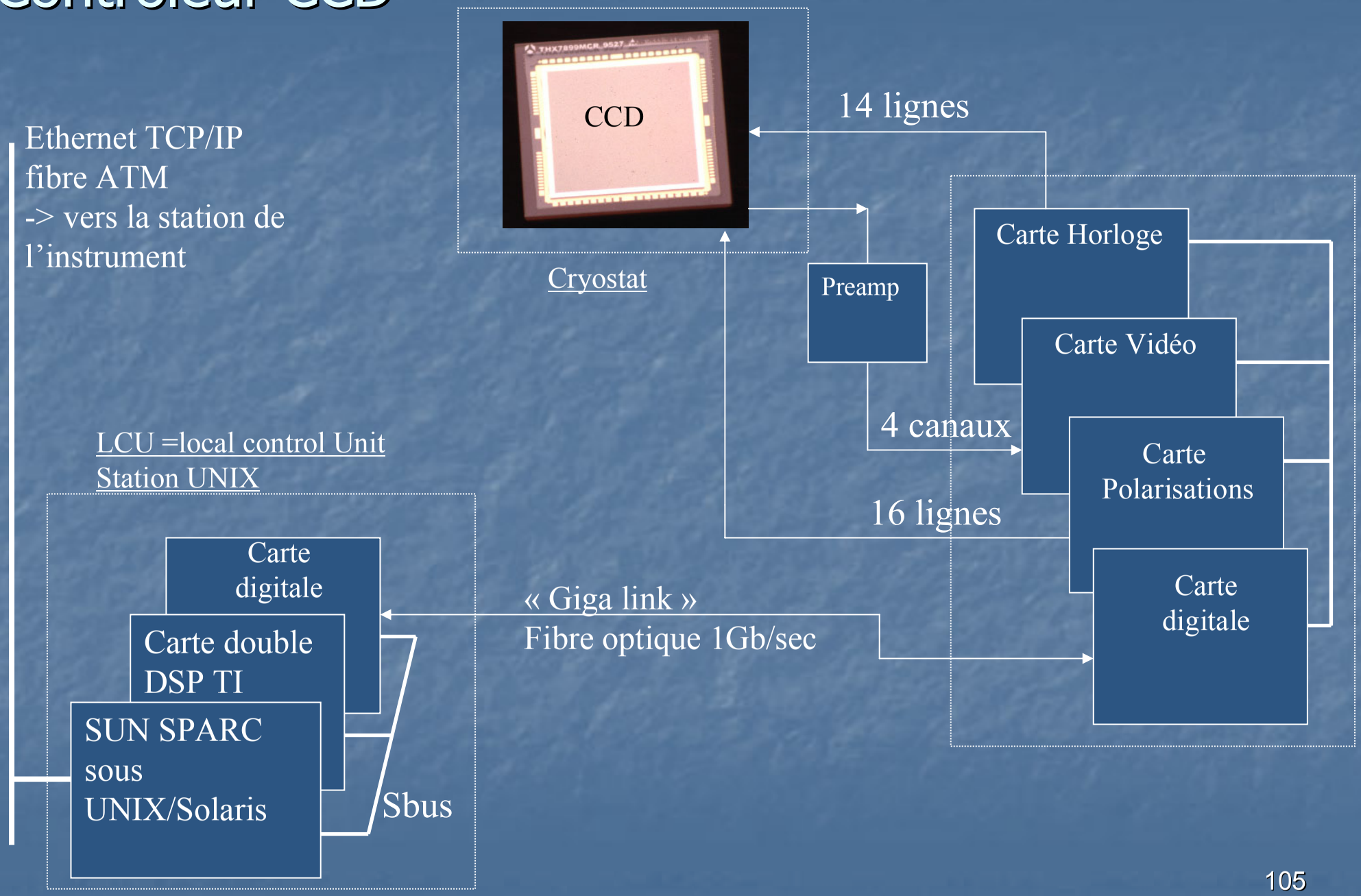


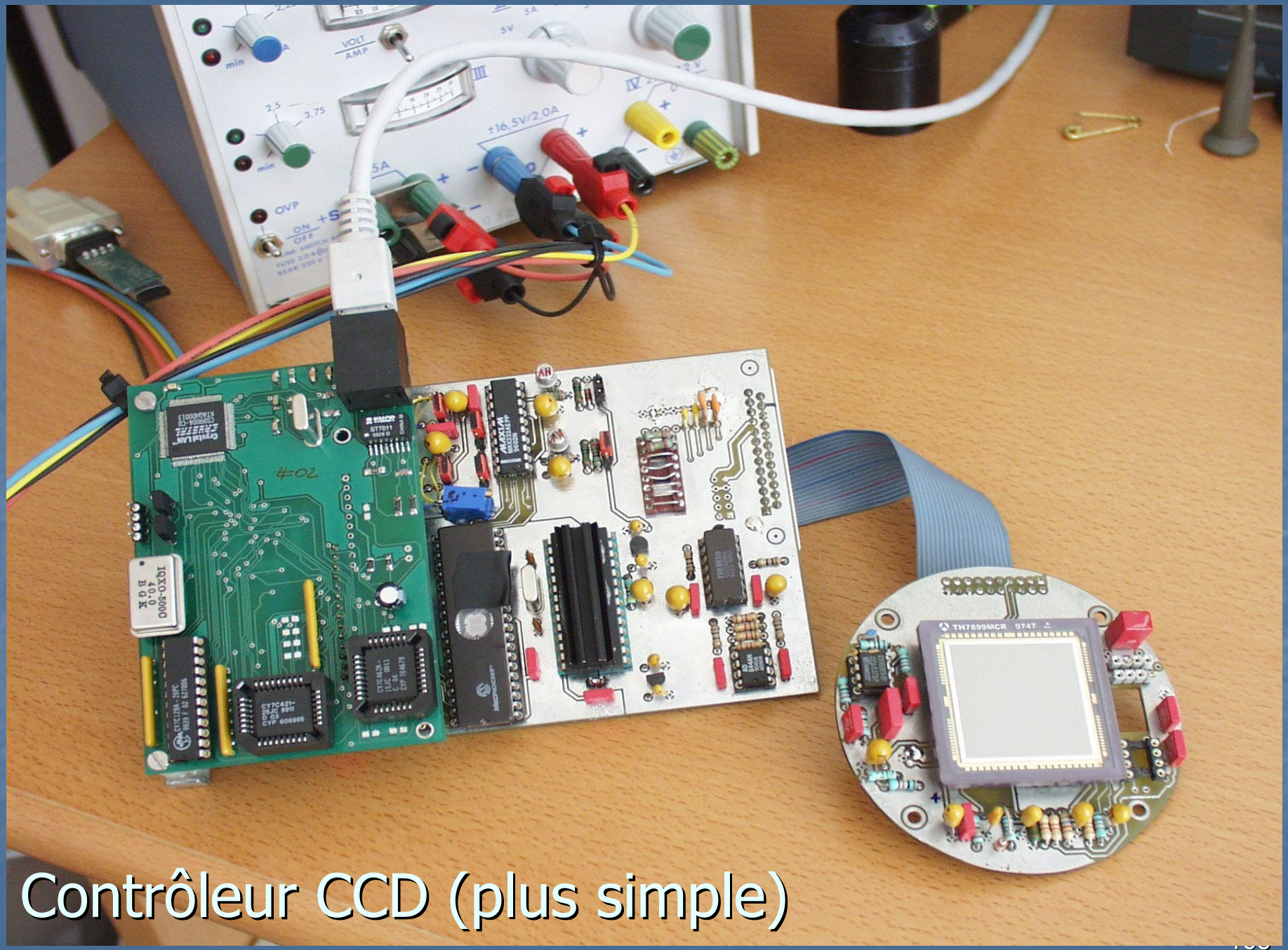


Zone de l'image

Bande passante = 5nm

Contrôleur CCD





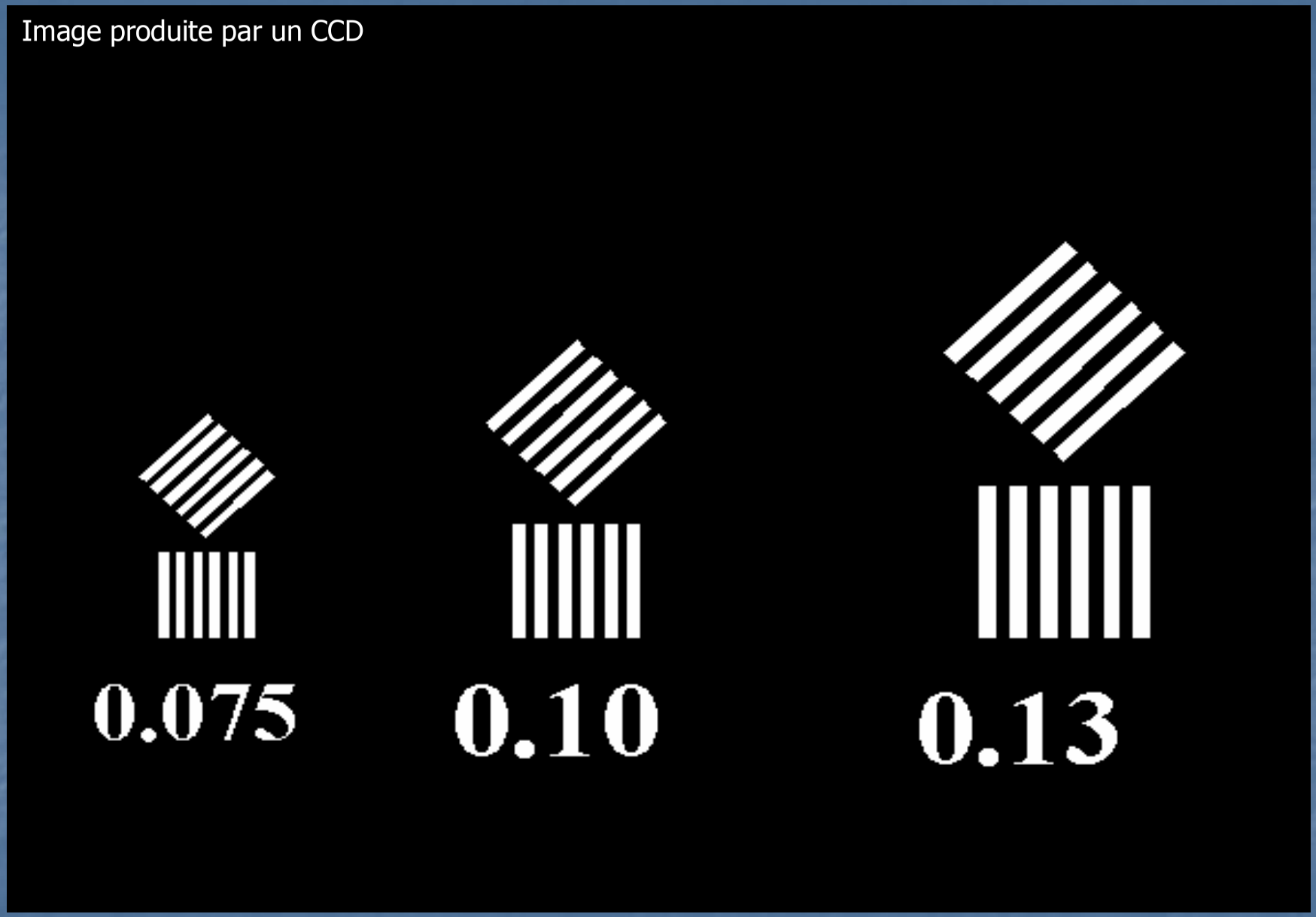
Contrôleur CCD (plus simple)

Choix d'un capteur d'images (niveau système)

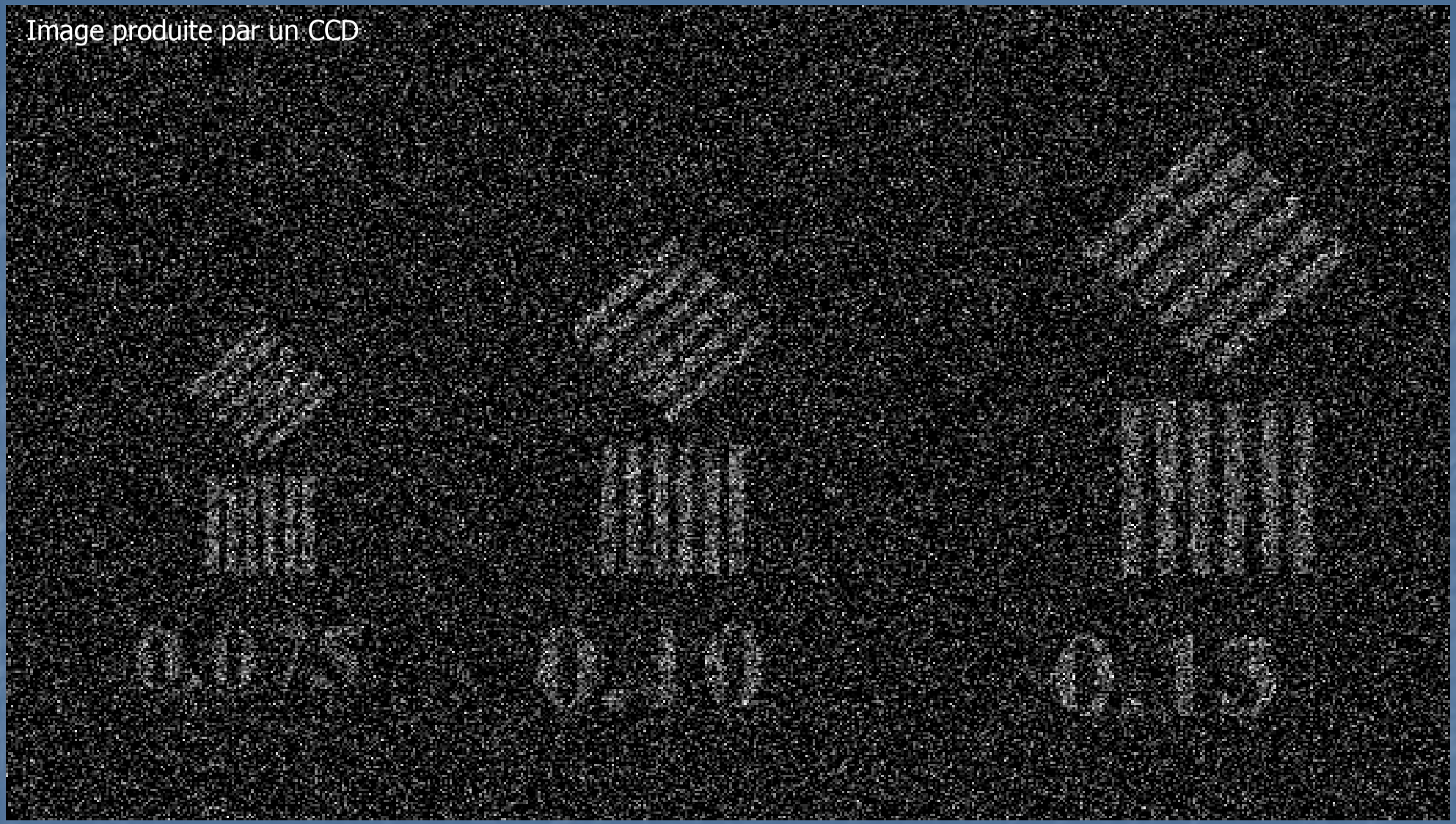
- Cahier des charges
  - Nombre de pixels, taille du pixel
    - optique : focale, champ
    - critère de Nyquist
  - Domaine spectral
    - Conforme à la transmission optique
  - Temps d'intégration minimum et maximum
  - Nombre de Photons (éclairement)
    - Détermine l'ouverture de l'optique
    - Détermination du bruit du détecteur
    - Calcul du SNR (Signal to Noise Ratio) pour différents éclairements
    - Calcul de la dynamique
    - Calcul du nombre de bits de numérisation

  - Sortie numérique ou vidéo de type analogique
    - Transmission des données numériques vers l'ordinateur (USB, fibre optique …)

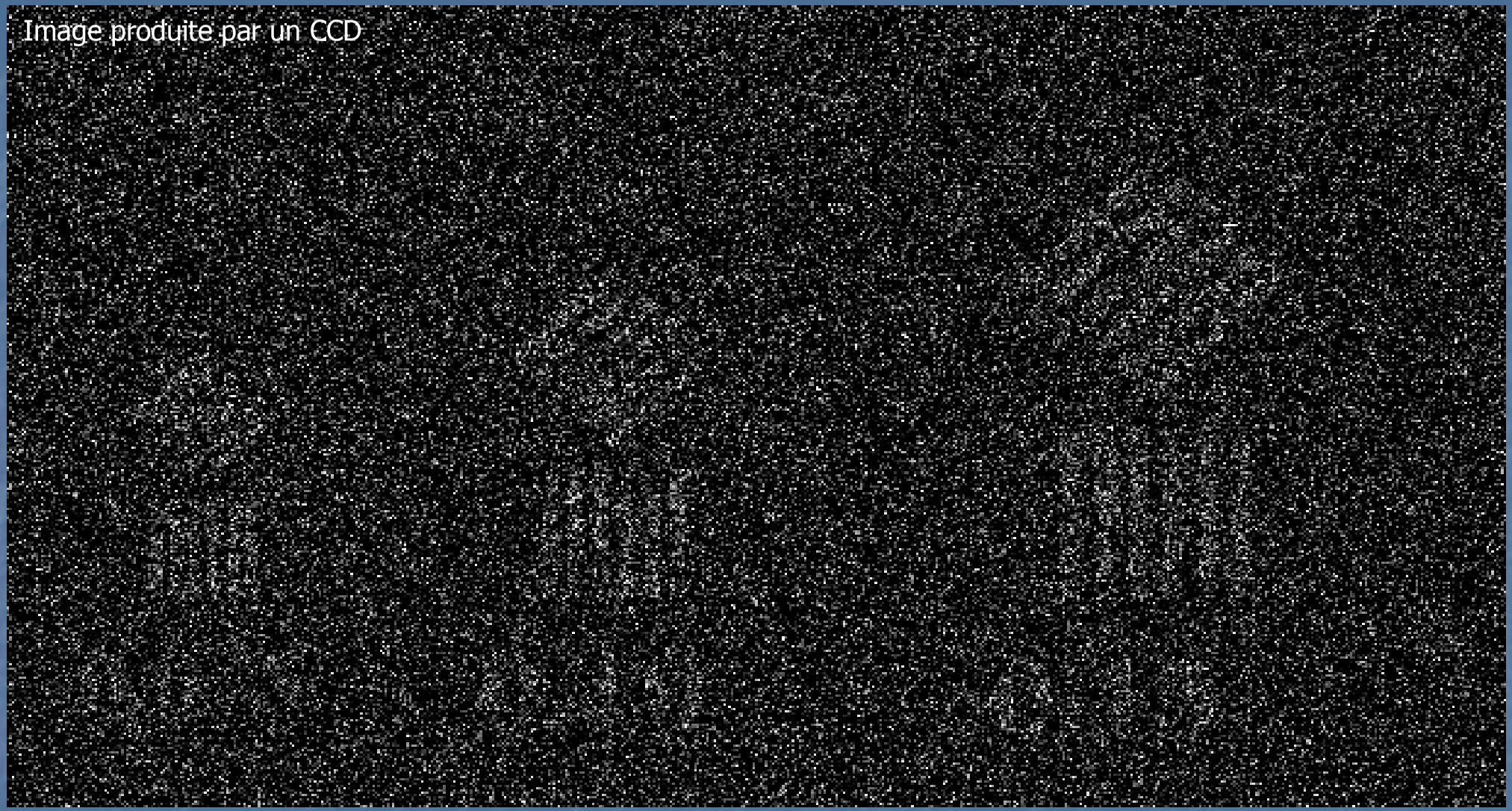
Image produite par un CCD



SNR (Signal to noise ratio) >>10000



SNR = 1



SNR = 0.5

Calcul SNR et réponse totale

SNR par un pixel, pour un temps d'intégration t

Etape 1. Calcul du bruit N (pour un pixel), pour une fréquence de lecture f donnée

- Bruit de lecture
- Bruit du courant d'obscurité (statistique de Poisson)
- Bruit de photons (statistique de Poisson)

$$N = \sqrt{\sigma_{lec}(f)^2 + \sigma_{dark}(t,T)^2 + \sigma_{photons}(t,I)^2}$$

$$\sigma_{lec}(f) : mesuré$$

$$\sigma_{dark}(t,T) = \sqrt{t.Dc(T)}$$

$$\sigma_{photons}(t,I) = \sqrt{Photons_elec(t,I)}$$

σ_{lec} : Bruit de lecture en e-

σ_{dark} : Bruit de courant d'obscurité en e-

$\sigma_{photons}$: Bruit de photons en e-

T : température détecteur (°K)
t : temps de pose ou intégration (s)
I : Flux de photons (irradiance…)

Dc(T) : courant d'obscurité e-/Pix/sec

$$SNR = \frac{S}{N}$$

Signal S = Photon_electrons(t,I)

Calcul SNR et réponse totale

$$Photons_elec(t,I) = fc.So.t \int_{0.2\mu m}^{1.1\mu m} I(\lambda)Qe(\lambda)\tau(\lambda)\frac{\lambda.10^{-6}}{hc}d\lambda$$

- Qe(λ) : rendement quantique (e-/photon) en fonction de λ
- I(λ) : irradiance incidente (J/sec/cm²/µm) en fonction de λ
- τ(λ) : transmission (filtres, optique, atmosphère) en fonction de λ
- So : Surface de la pupille en cm²
- fc : Facteur de concentration de toute la pupille sur un seul pixel (qualité optique)
- t : temps de pose en sec

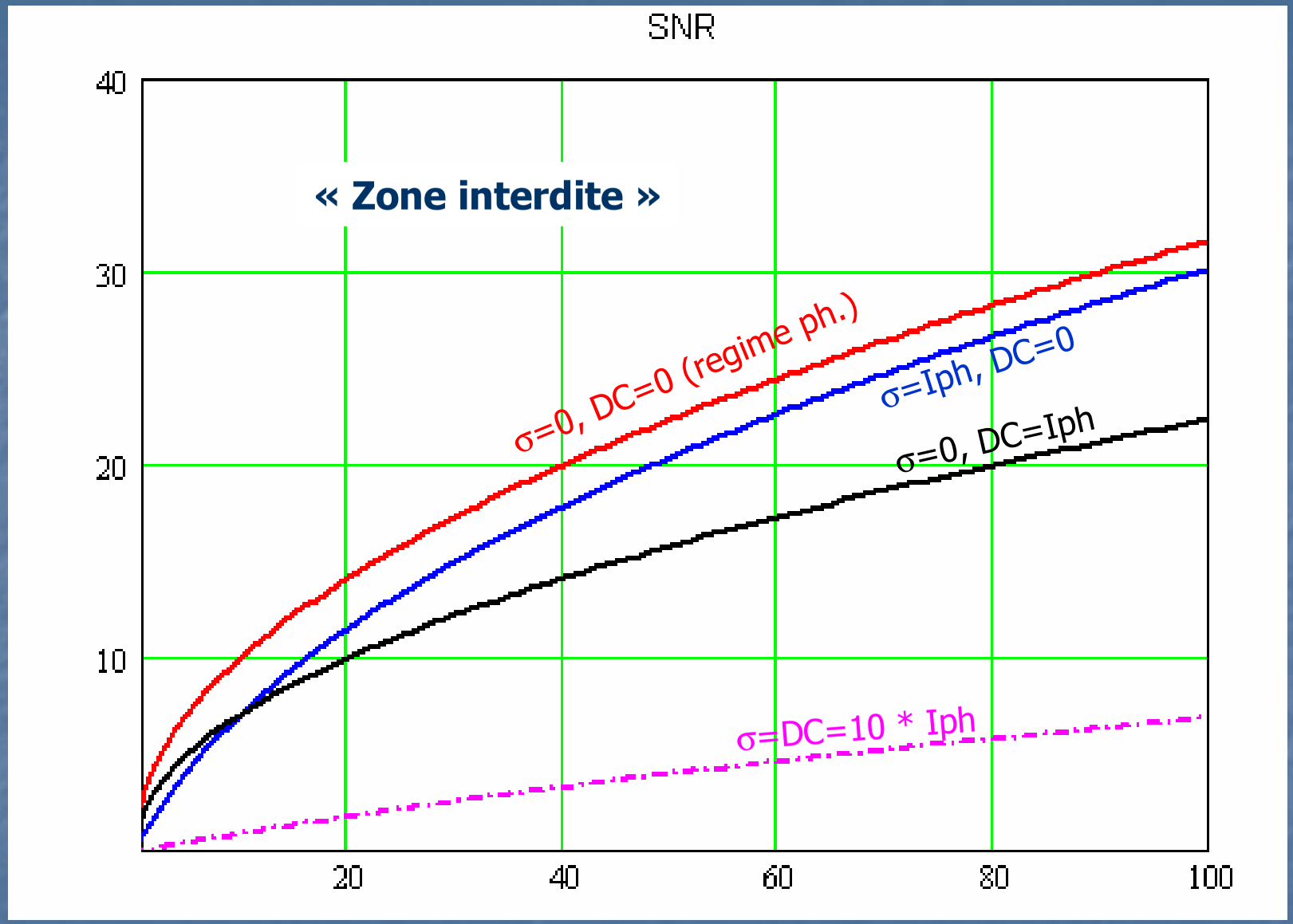
La formule du calcul du nombre de photon par pixel varie en fonction du système optique associé

$$SNR = \frac{fc.So.t \int_{0.2\mu m}^{1.1\mu m} I(\lambda)Qe(\lambda)\tau(\lambda)\frac{\lambda.10^{-6}}{hc}d\lambda}{\sqrt{\sigma_{lec}(f)^2 + t.Dc(T) + fc.So.t \int_{0.2\mu m}^{1.1\mu m} I(\lambda)Qe(\lambda)\tau(\lambda)\frac{\lambda.10^{-6}}{hc}d\lambda}}$$

$$Iph = fc.So \int_{0.2\mu m}^{1.1\mu m} I(\lambda)Qe(\lambda)\tau(\lambda)\frac{\lambda.10^{-6}}{hc}d\lambda$$

$$SNR = \frac{Iph.t}{\sqrt{\sigma_{lec}(f)^2 + t.(Dc(T) + Iph)}}$$

- Permet de dimensionner un système, et d'en connaître le SNR
- Cas idéal (pas de bruit de lecture, pas de courant d'obs.) Le SNR croit en Racine de Iph*t
- Le bruit de lecture est souvent prépondérant lorsque t est petit
- Limite naturelle de bruit de photons infranchissable
    - Régime atteint pour de fort éclairements, ou Dc et σ négligeables devant Iph

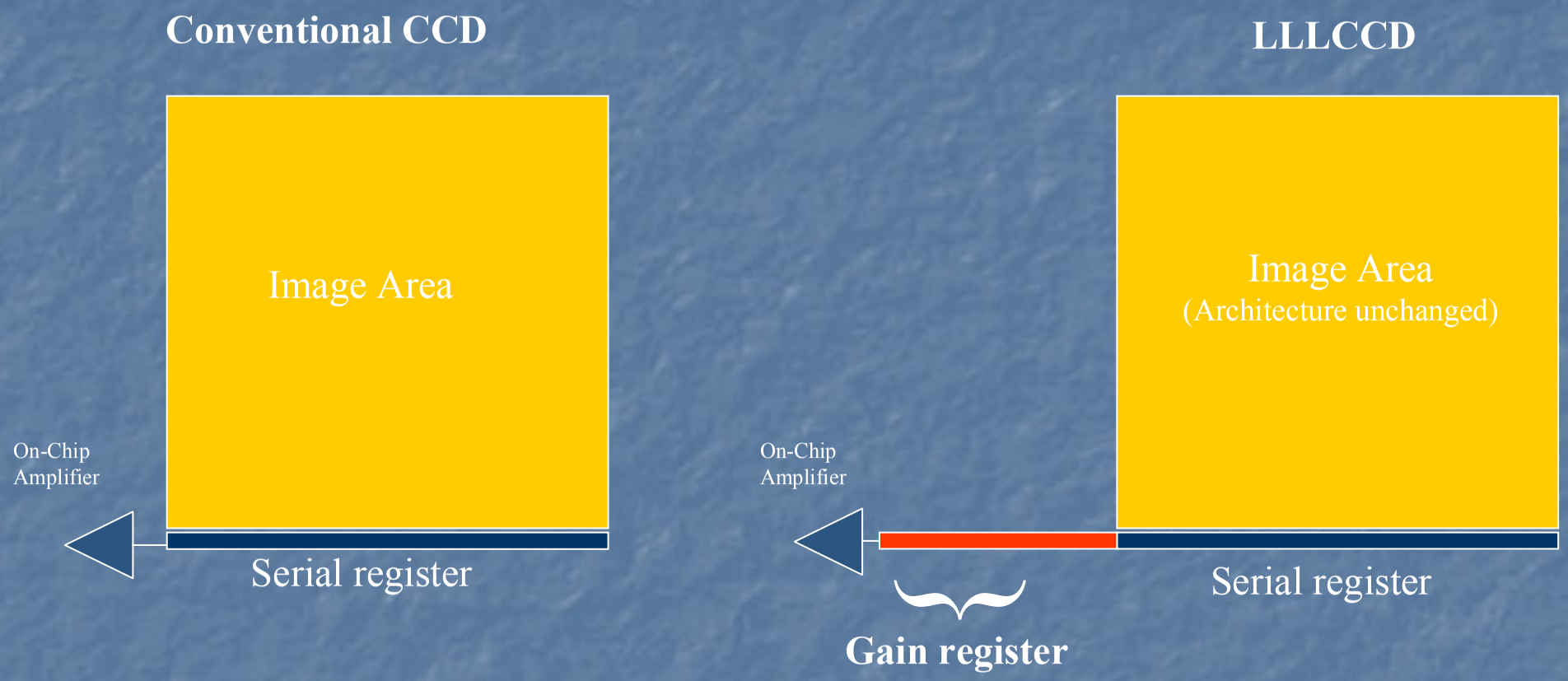


SNR

t

Iph constant

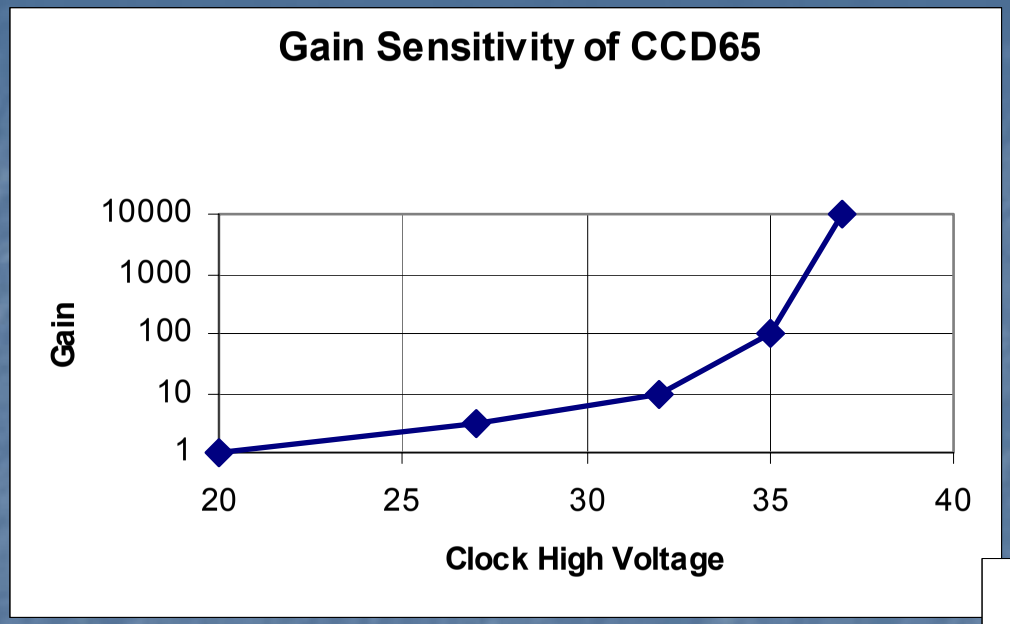
LLL CCD or zéro readout noise CCD : Principe

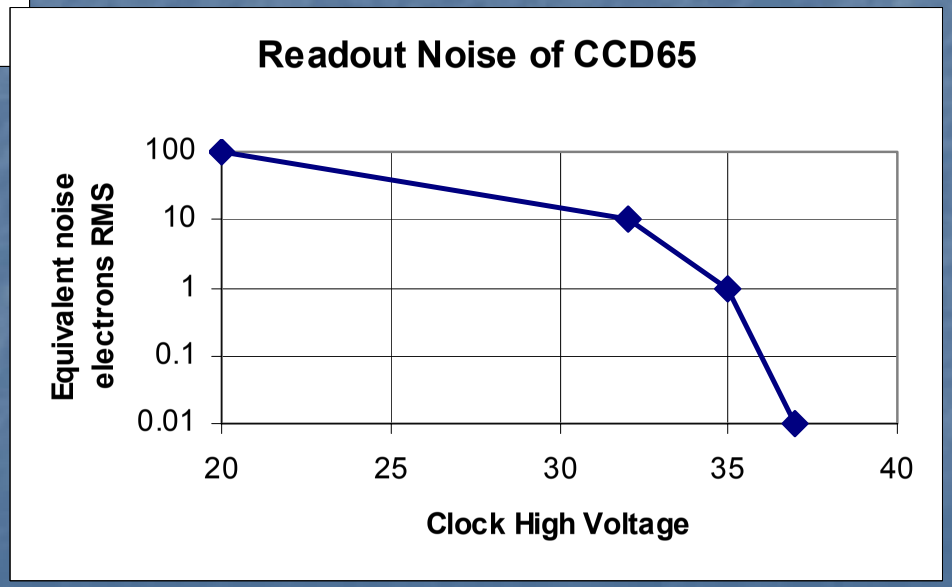


The Gain Register can be added to any existing design

1e- turns into 100e-, so compare it to 10e- provided by the CCD amplifier (!)

Multiplication Clocking 4





The Multiplication Register has a gain strongly dependant on the clock voltage

Noise equations

Conventional CCD SNR Equation

$$SNR = Q.I.t.\left[Q.t.I + N_r^2\right]^{-0.5}$$

Q = Quantum Efficiency
I = Photons per pixel per second
t = Integration time in seconds
N_r = Amplifier (read-out) noise in electrons RMS

Trade-off between readout speed and readout noise

Very hard to get N_r < 3e, and then only by slowing down the readout significantly. At TV frame rates, noise > 50e

LLLCCD SNR Equation

$$SNR = Q.I.t.F_n.\left[Q.t.F_n.I + (N_r/G)^2\right]^{-0.5}$$

G = Gain of the Gain Register
F_n = Multiplication Noise factor = 0.5

Readout speed and readout noise are decoupled

With G set sufficiently high, this term goes to zero, even at TV frame rates.

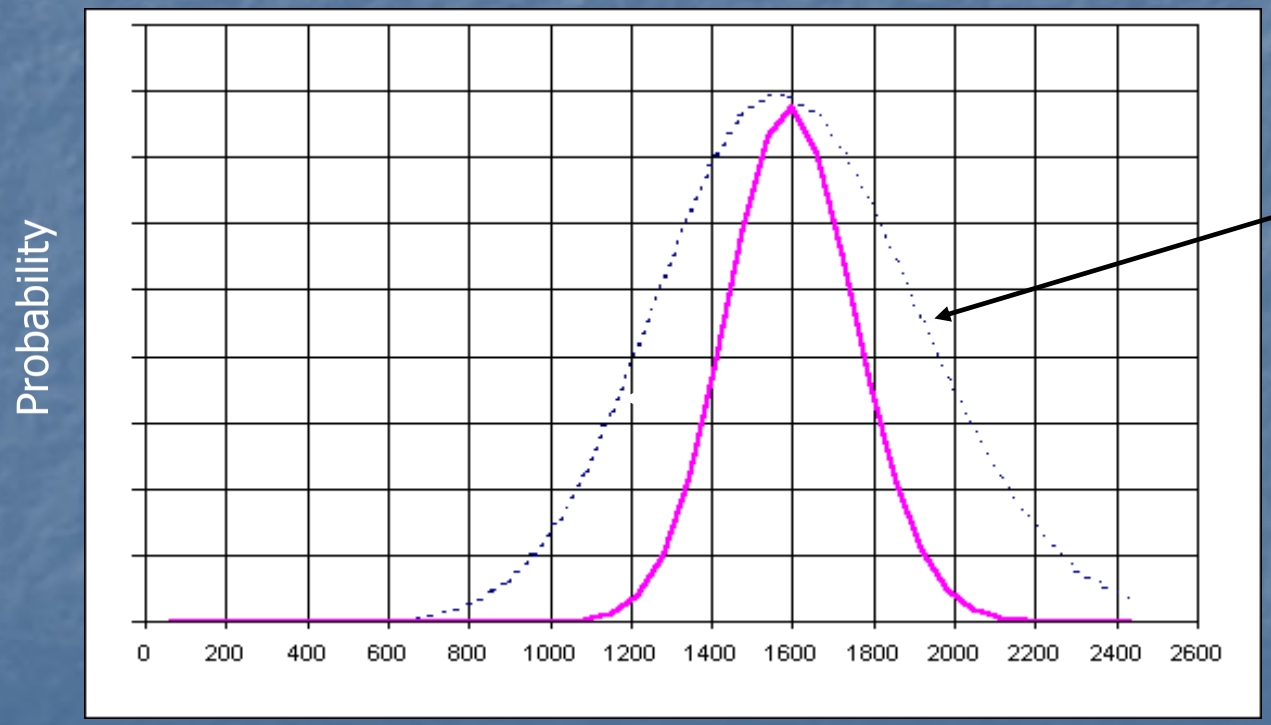
Unfortunately, the problem of multiplication noise is introduced

Multiplication Noise

In this example, A flat field image is read out through the multiplication register. Mean illumination is 16e/pixel. Multiplication register gain =100

Ideal Histogram, StdDev=Gain x (Mean Illumination in electrons $)^{0.5}$

Actual Histogram, StdDev=Gain x (Mean Illumination in electrons $)^{0.5}$ x **M**

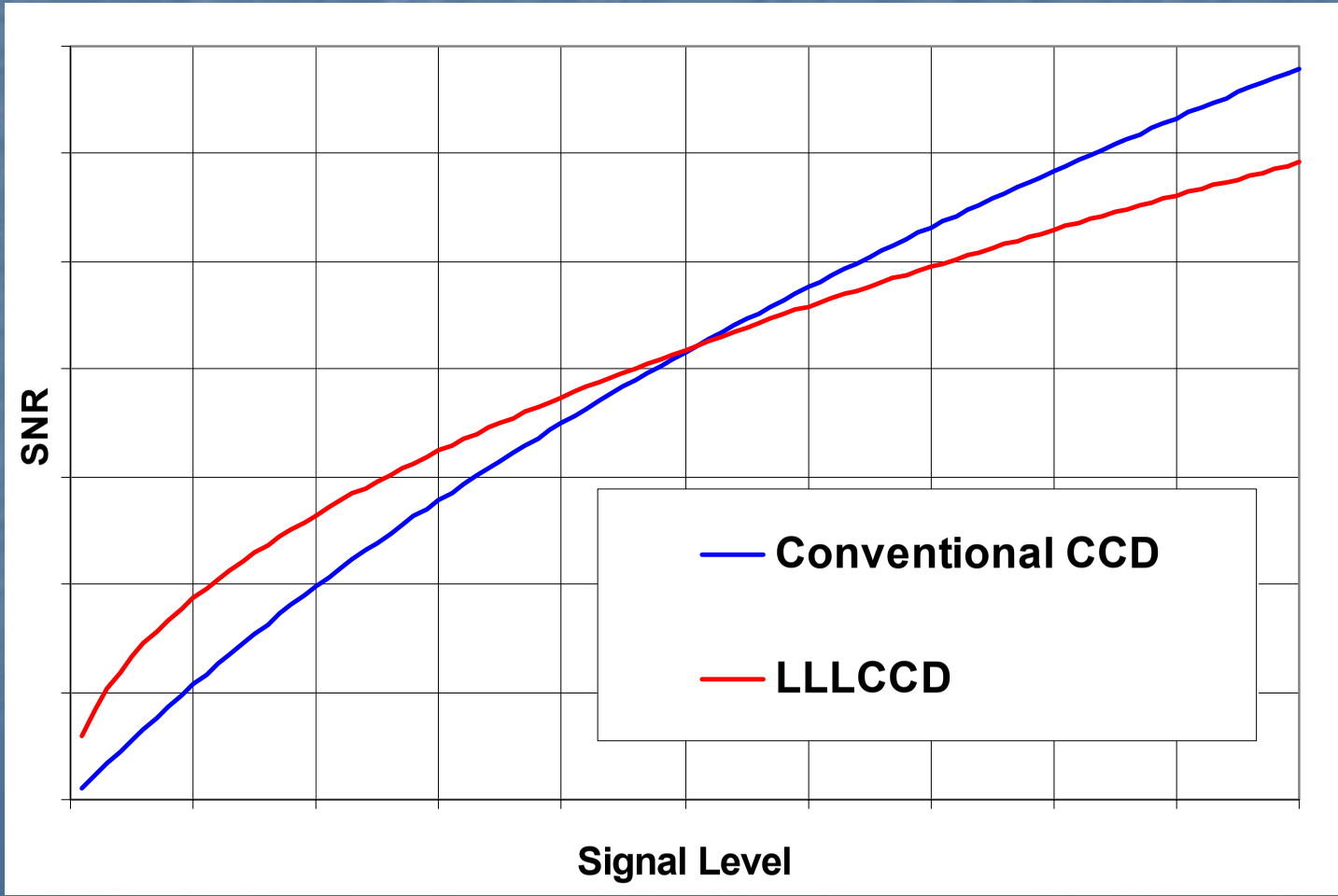


Histogram broadened by multiplication noise

M=1.4

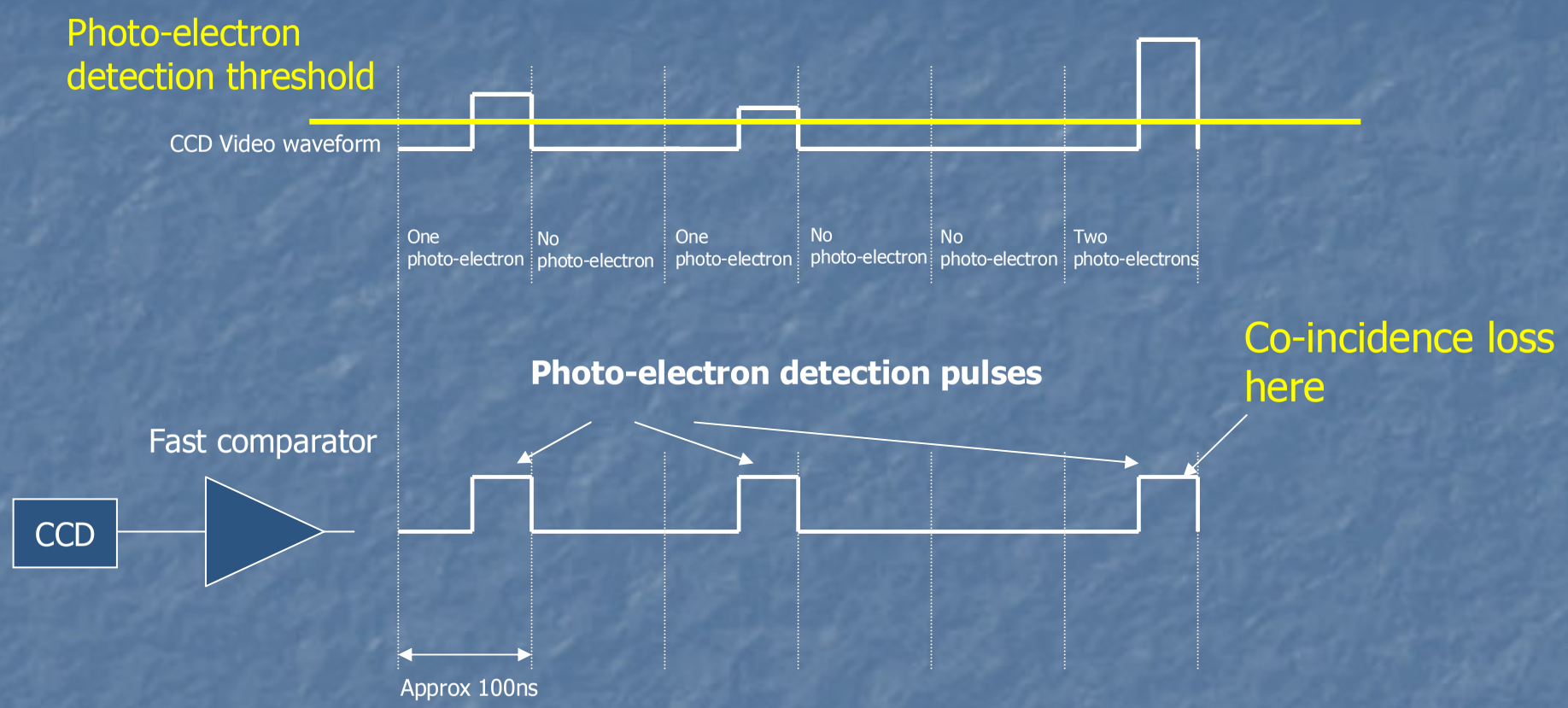
Multiplication Noise

Multiplication noise has the same effect as a reduction of QE by a factor of two. In high signal environments , LLLCCDs will generally perform *worse* than conventional CCDs. They come into their own, however, in low signal, high-speed regimes.



Photon counting

Offers a way of removing multiplication noise.



$$\mathbf{SNR} = \mathbf{Q.I.t.}\left[\mathbf{Q.t.\ I}\right]^{-0.5}$$

Noiseless Detector

The three operational regimes of LLLCCDs

1) Unity Gain Mode.

The CCD operates normally with the SNR dictated by the photon shot noise added in quadrature with the amplifier read noise. In general a slow readout is required (300KPix/second) to obtain low read noise (4 electrons would be typical). Higher readout speeds possible but there will be a trade-off with the read-noise.

2) High Gain Mode.

Gain set sufficiently high to make noise in the readout amplifier of the CCD negligible. The drawback is the introduction of Multiplication Noise that reduces the SNR by a factor of 1.4. Read noise is de-coupled from read-out speed. Very high speed readout possible, up to 11MPixels per second, although in practice the frame rate will probably be limited by factors external to the CCD.

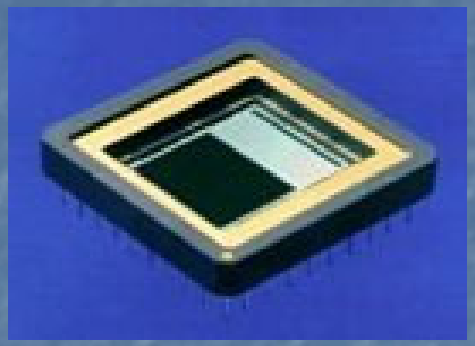
3) Photon Counting Mode.

Gain is again set high but the video waveform is passed through a comparator. Each trigger of the comparator is then treated as a single photo-electron of equal weight. Multiplication noise is thus eliminated. Risk of coincidence losses at higher illumination levels.

Marconi LLLCCD

CCD65

Aimed at TV applications as a substitute for image tube sensors. 576 x 288 pixels. Thick frontside illuminated, peak QE of 35%.
20 x 30um pixels



Camera systems based on this chip available winter 2001

CCD 60

128x 128 pixel, thinned, has been built but still under development. For possible application to Wavefront Sensing.

Low Priority for Marconi without encouragement from the astronomical community

CCD 79,86,87

Proposed future devices up to 1K square, > 10 frames per second readout at sub-electron noise levels.

As above

Acteurs du CCD

Société	Pays	Marché
Sony	Japon	Grand public
Texas Instrument	USA	Grand public
Kodak	USA	Grand public – scientifique
Dalsa (ex Philips)	USA	Contrôle non destructif
ATMEL	France	Imagerie médicale
E2V (Marconi/EEV)	UK	Leader en CCD scientifique
Fairchild	USA	Imagerie médicale Aéroporté Mil.
Hamamatsu	Japon	Scientifique
Site	USA	Scientifique

Conclusions CCD

- CCD :
  - technologie très mature et bien maîtrisée
  - Capteur parfait ?
  - essentiel du marché « VISION »
  - tiré par marché « grand public »
  - objet de recherches en vue d 'améliorer performances
    - Bruit, QE, nombre de pixels
  - Mais
    - Utilise une technologie très spécifique
    - Le transfert de charge.. Limitation Grand format
    - Tensions élevées (non compatibles 5v ou 3.3v)
    - Cher et lent à lire…
  - Une alternative ? Les capteurs CMOS….

Capteur d'images APS - CMOS

APS : Active Pixels Sensors

CCD et CMOS : Définitions

- CCD : *Charge-Coupled Devices :*

  Technologie mise au point par Bell Labs début des années 1970

- Capteur d 'image CMOS :

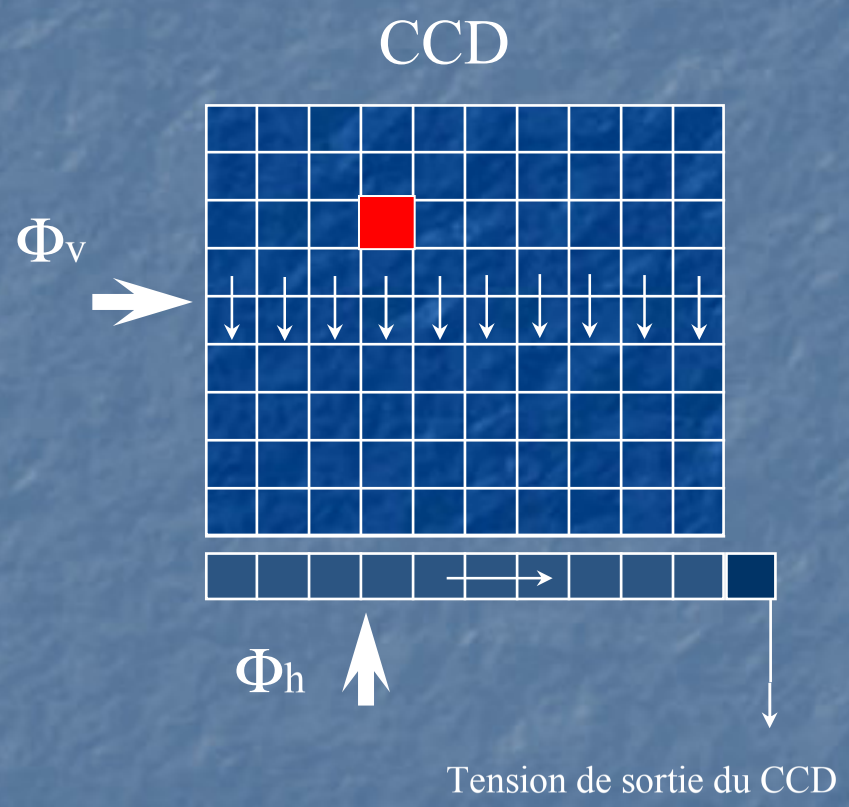
  Technologie mise au point par JPL (Nasa) au milieu de 1990

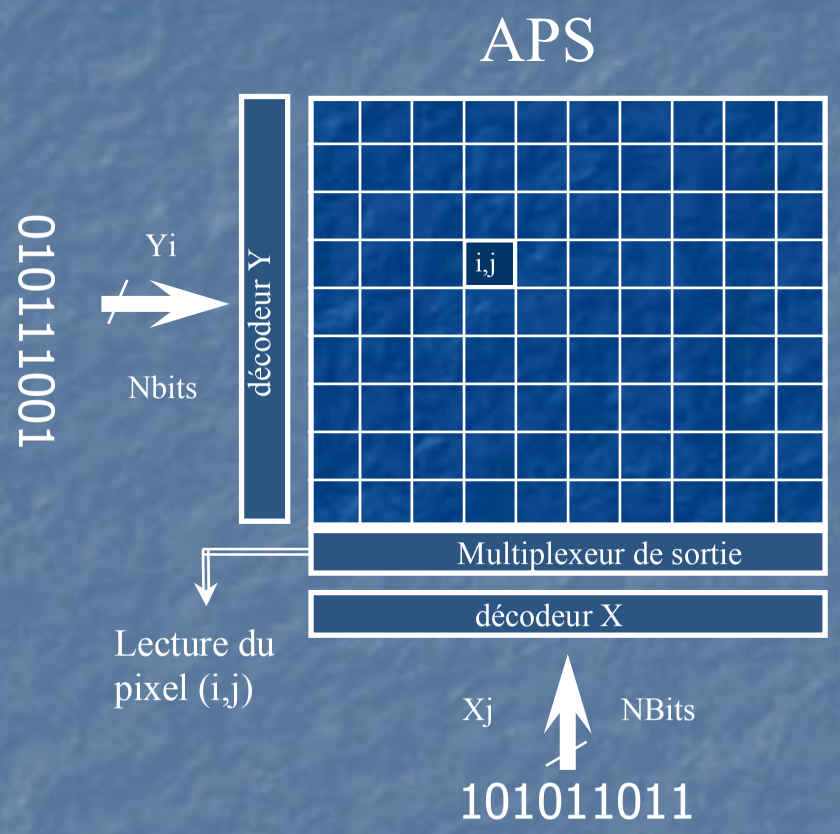
- CMOS : *Complementary Metal-Oxide semiconductor* :

  Technologie utilisée pour réaliser plupart des CPU et mémoires.

Qu'est ce qu'un APS ?

- APS = Active Pixel Sensor

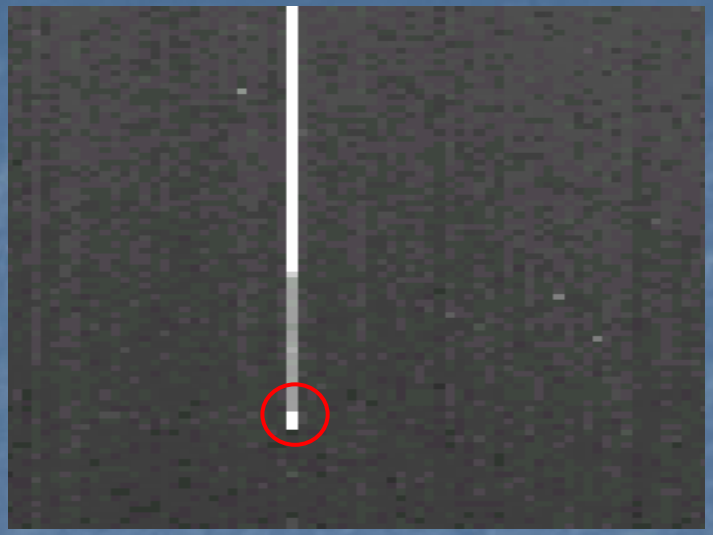




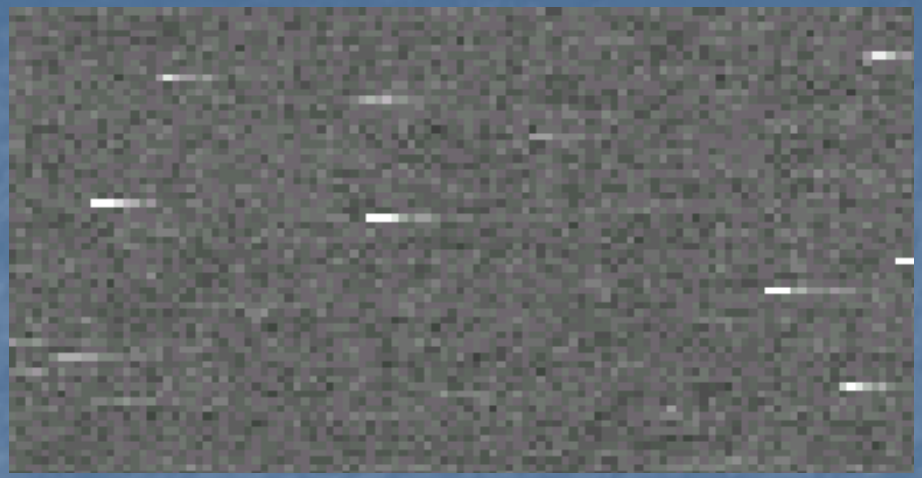
- Transfert de charges !

- Camera CCD Lecture aléatoire
- CMOS compatible (5V)
- Pas de transfert de charges !

Le CCD et le transfert des charges



- Seul pixel défectueux
- Tte la colonne défectueuse

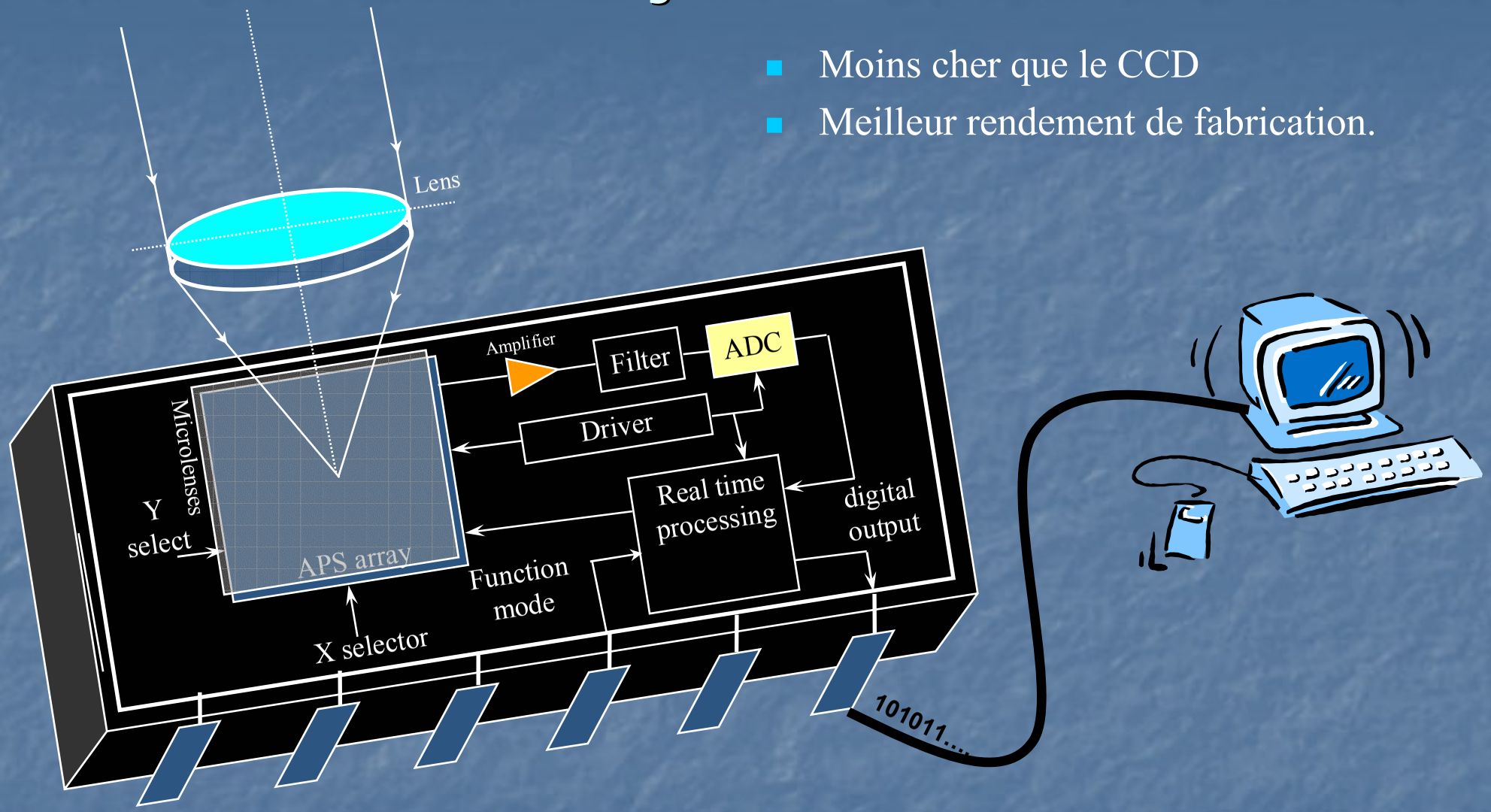


- Inefficacité de transfert de charges
- Rend difficile la réalisation de grandes matrices
- Environnement spatial ou soumis aux radiations

Effet de Blooming
- Dégradation de la qualité cosmétique de l'image
- CCD anti-blooming

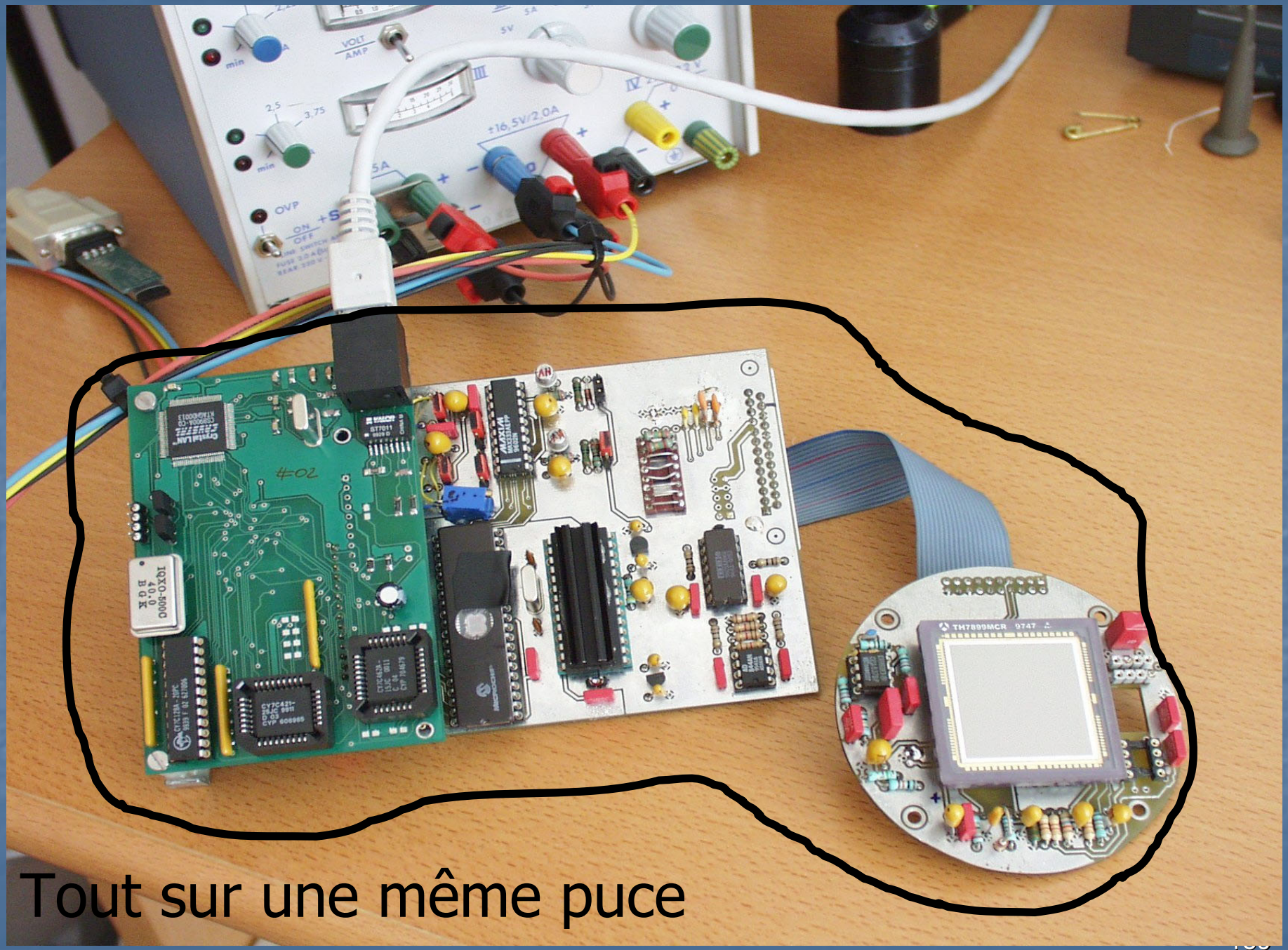
Avantages de l'APS

- Moins cher que le CCD
- Meilleur rendement de fabrication.



- Intégration de toute l'électronique sur une seule puce.

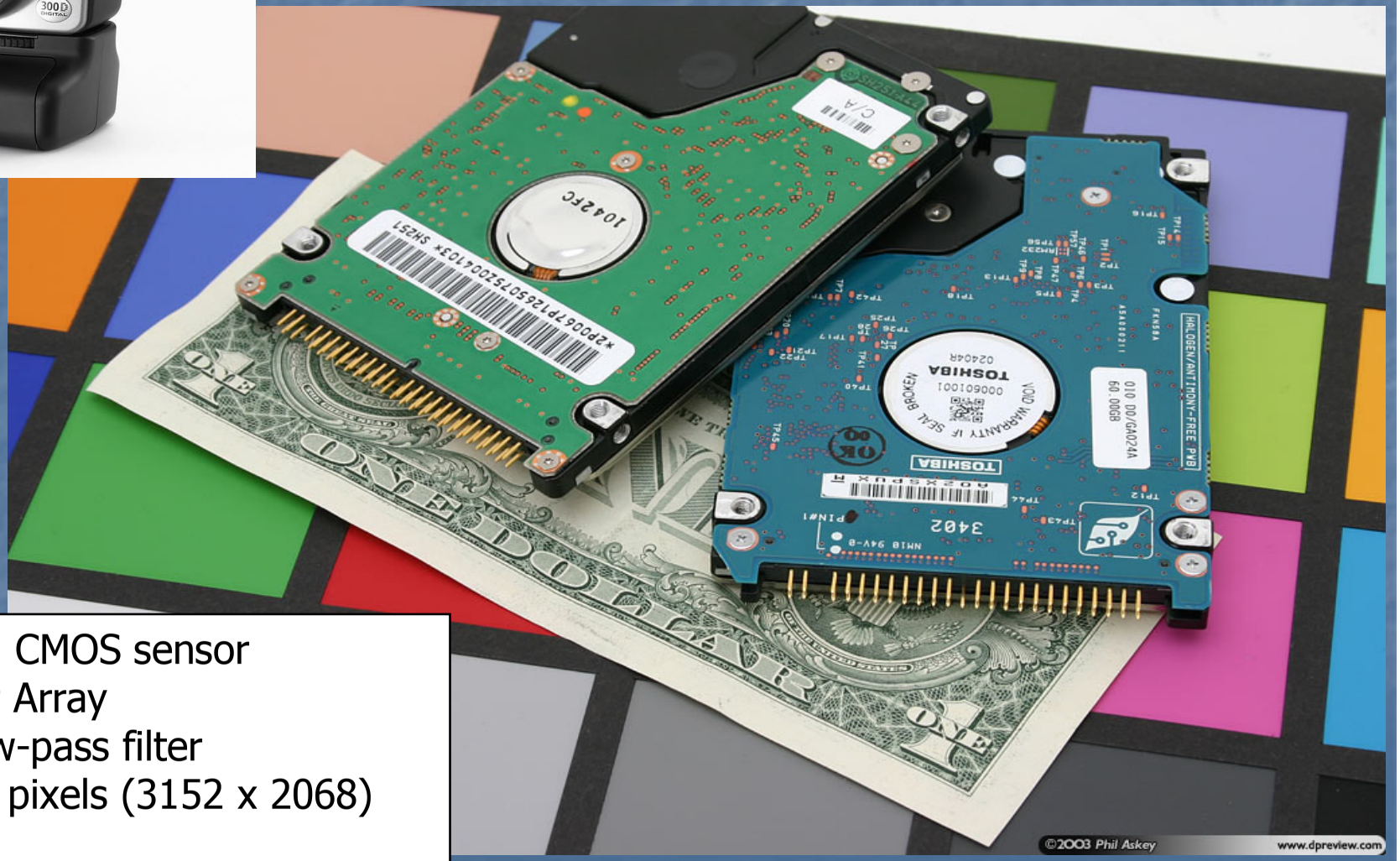
• Encombrement réduit
• Faible consommation qq mW (5 à 10 fois moins qu'un CCD)



Tout sur une même puce

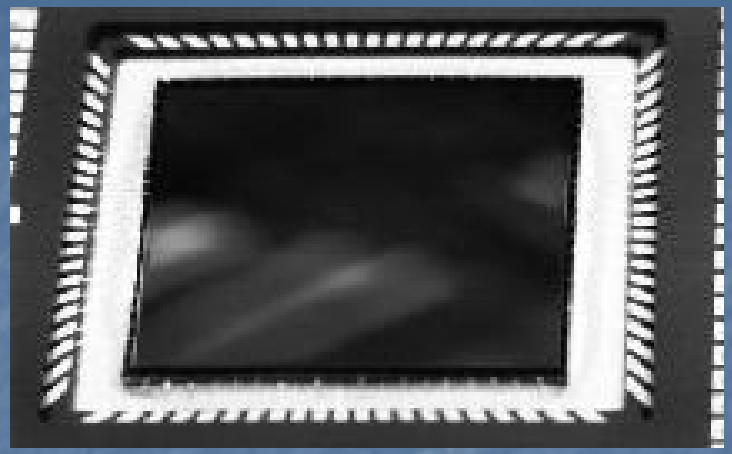
Un concept qui marche !

CANON 300D – 6 Megapixels

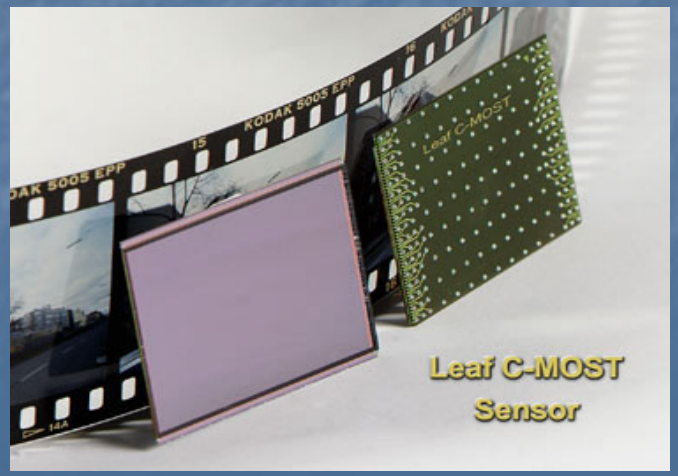


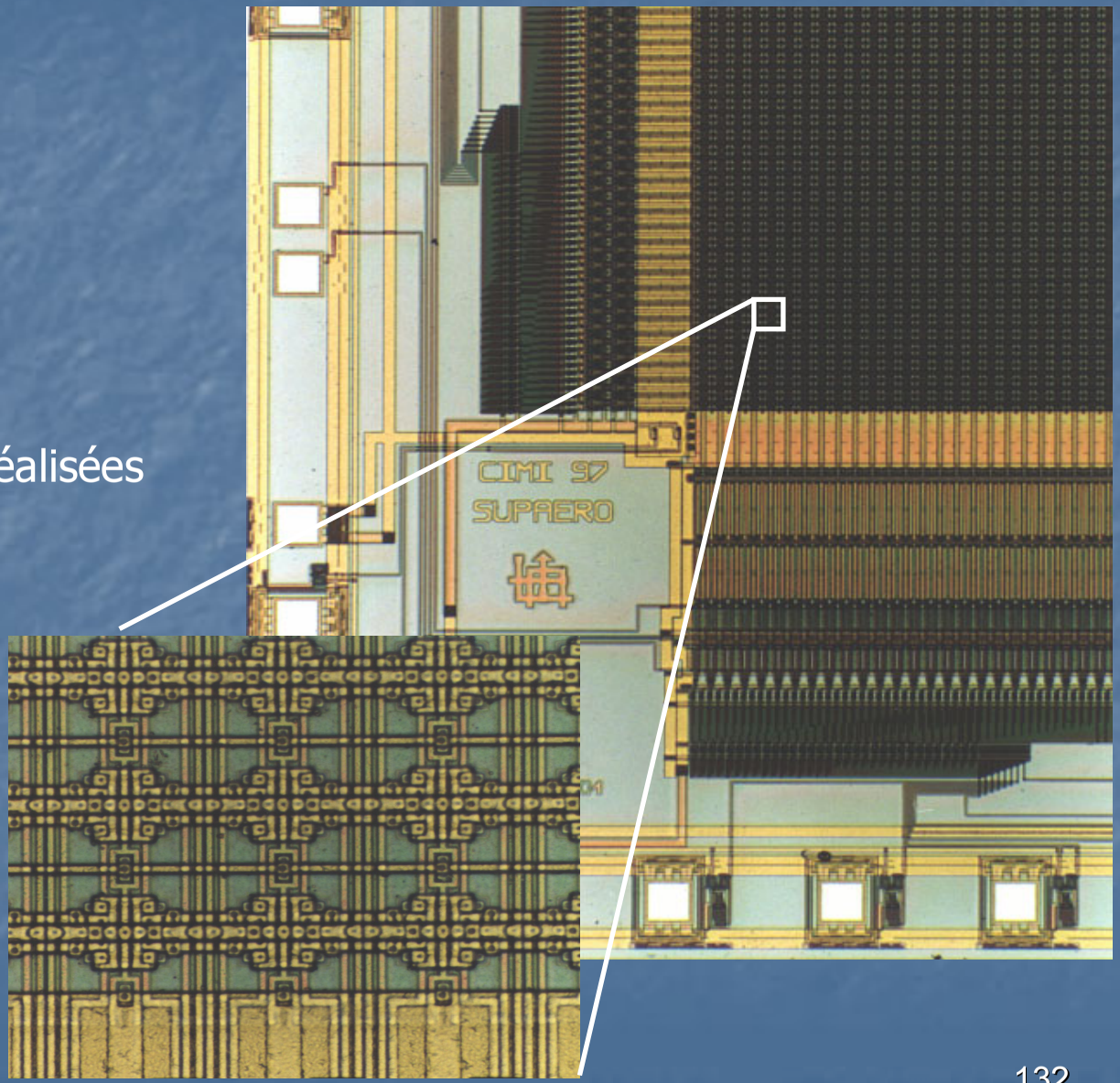
- 22.7 x 15.1 mm CMOS sensor
- RGB Color Filter Array
- Built-in fixed low-pass filter
- 6.5 million total pixels (3152 x 2068)

A quoi ca ressemble ?



- APS 2048x2048 IMEC
- Grande surfaces rapidement réalisées depuis 1995
- Détecteurs 24x36 mm

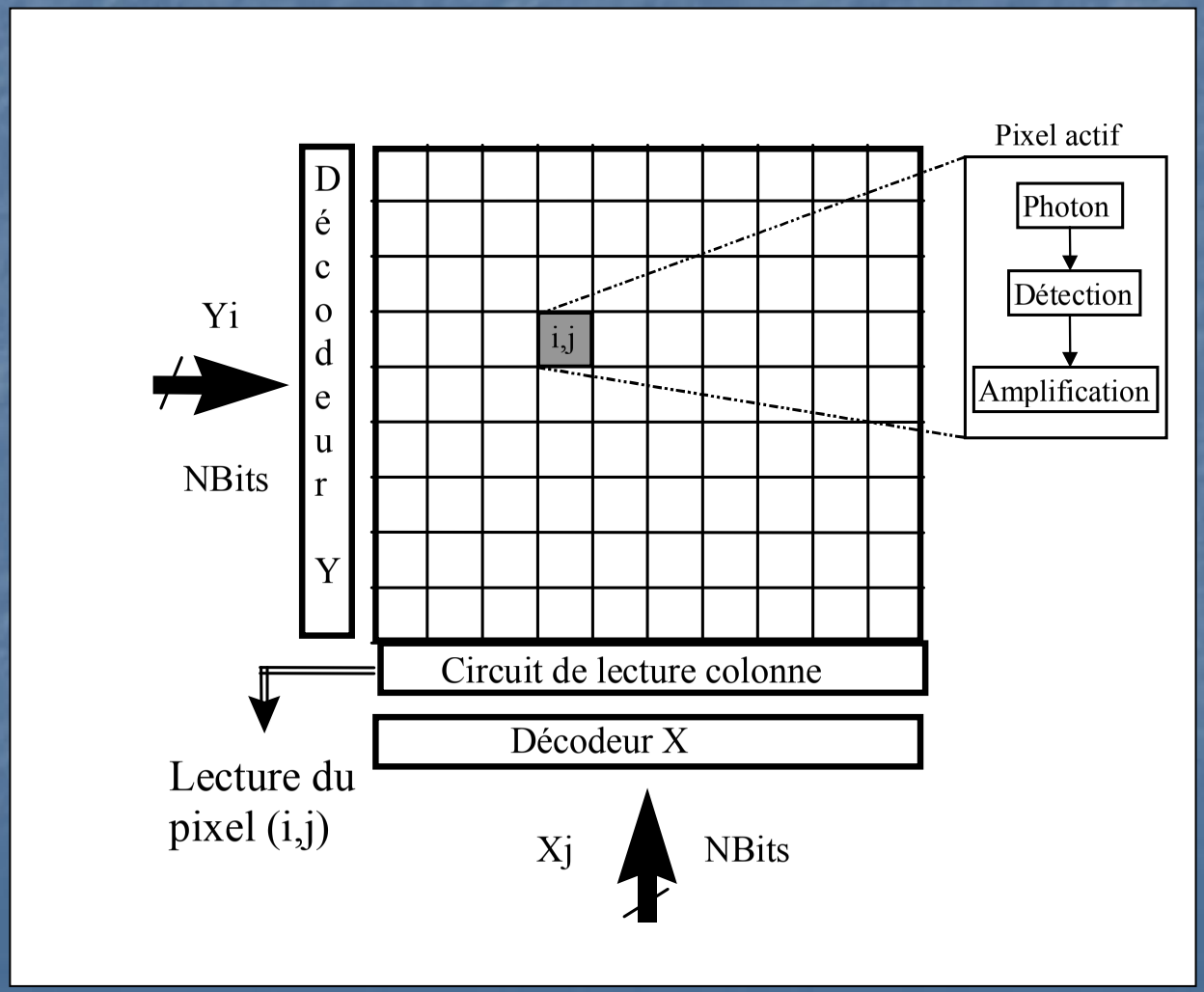




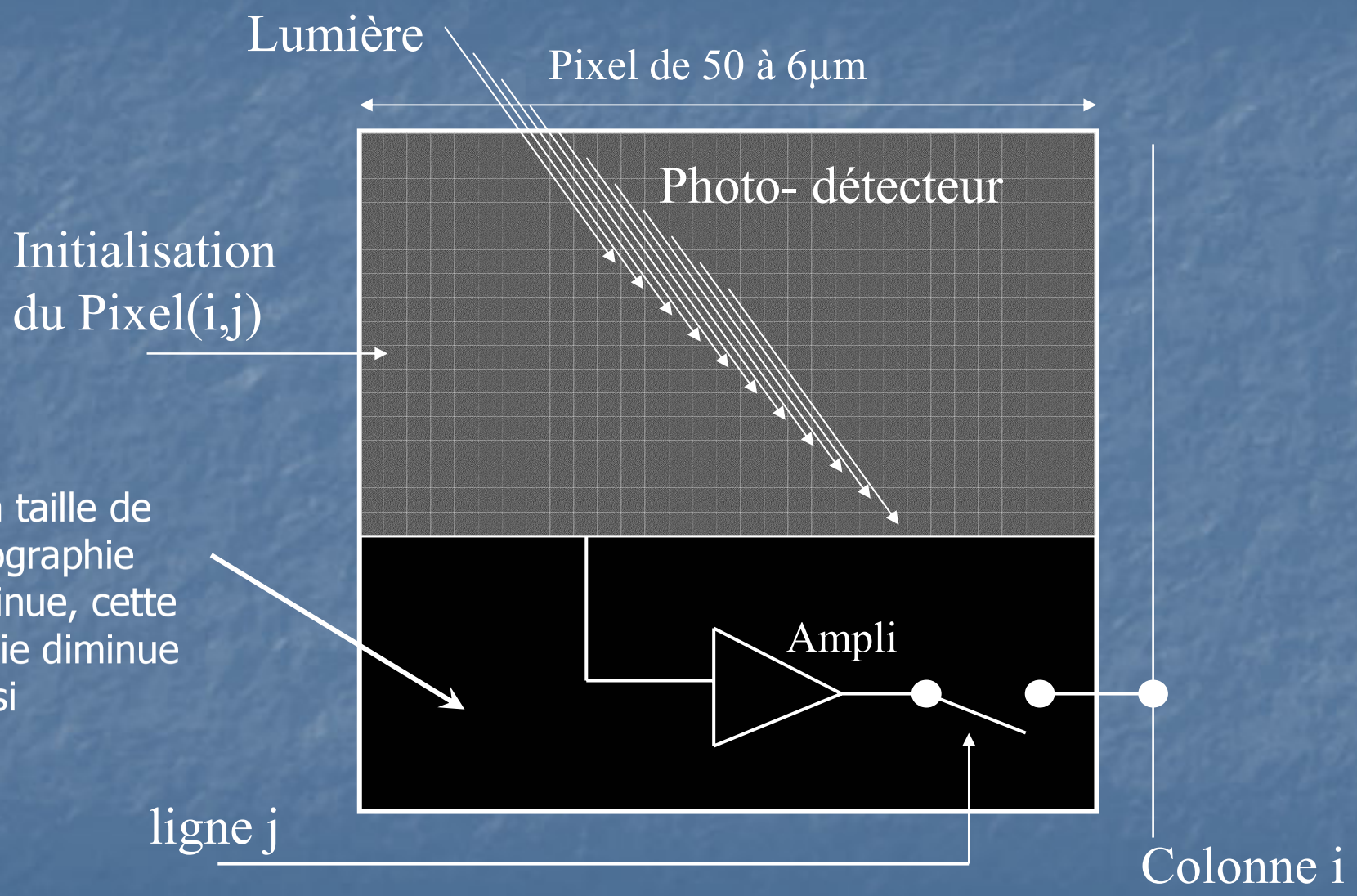
Un nouveau concept l'APS

- Travaux initiés sur les « Active Pixel Sensor » par le JPL en 1992

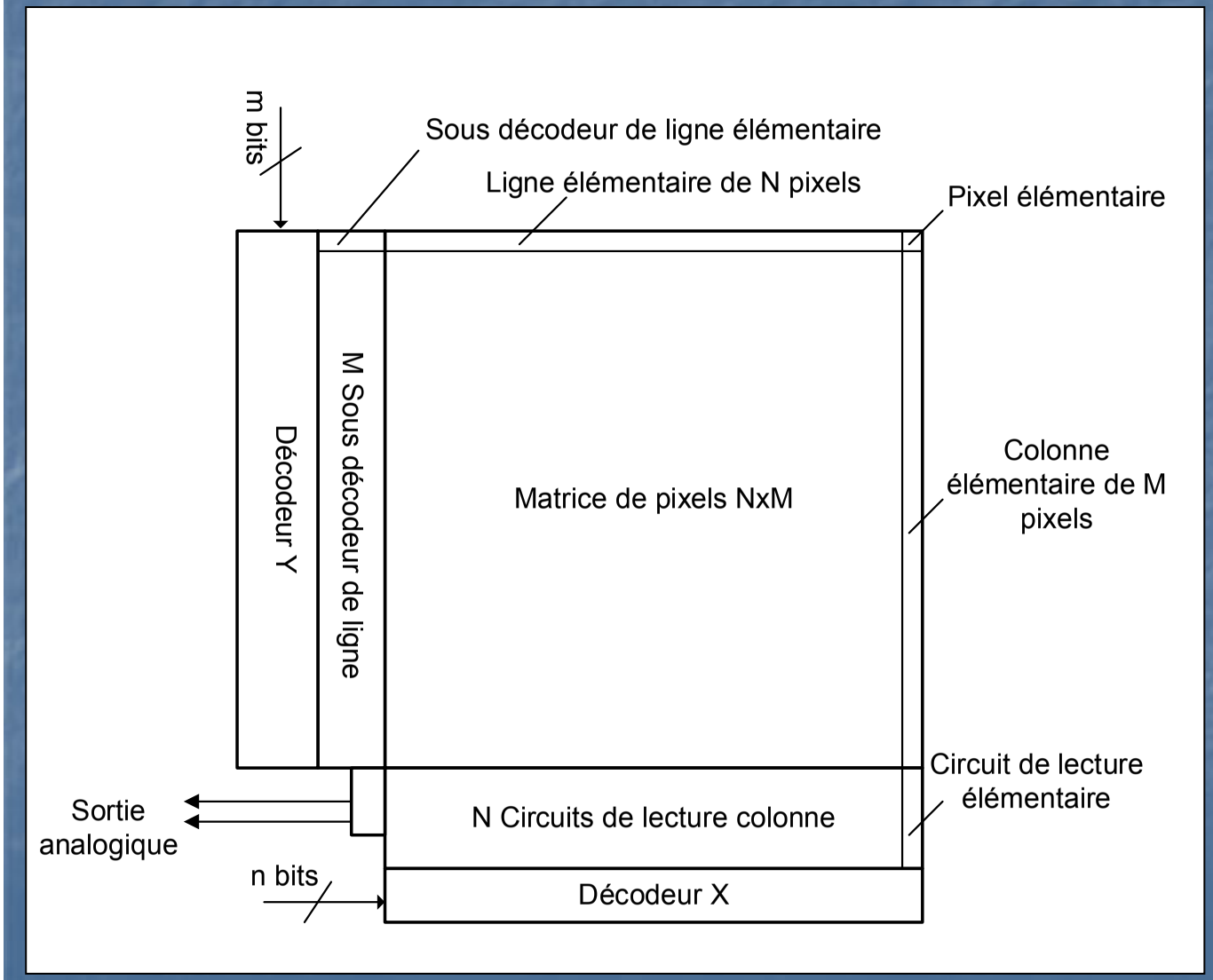
- Combinaison du capteur CCD et PPS
- Réalise la conversion photon-électron dans le pixel
- Idée rendue possible par la réduction de la lithographie CMOS en dessous de 2µm
- Ses avantages entraînent une recherche intensive



Dans le pixel d'un APS…

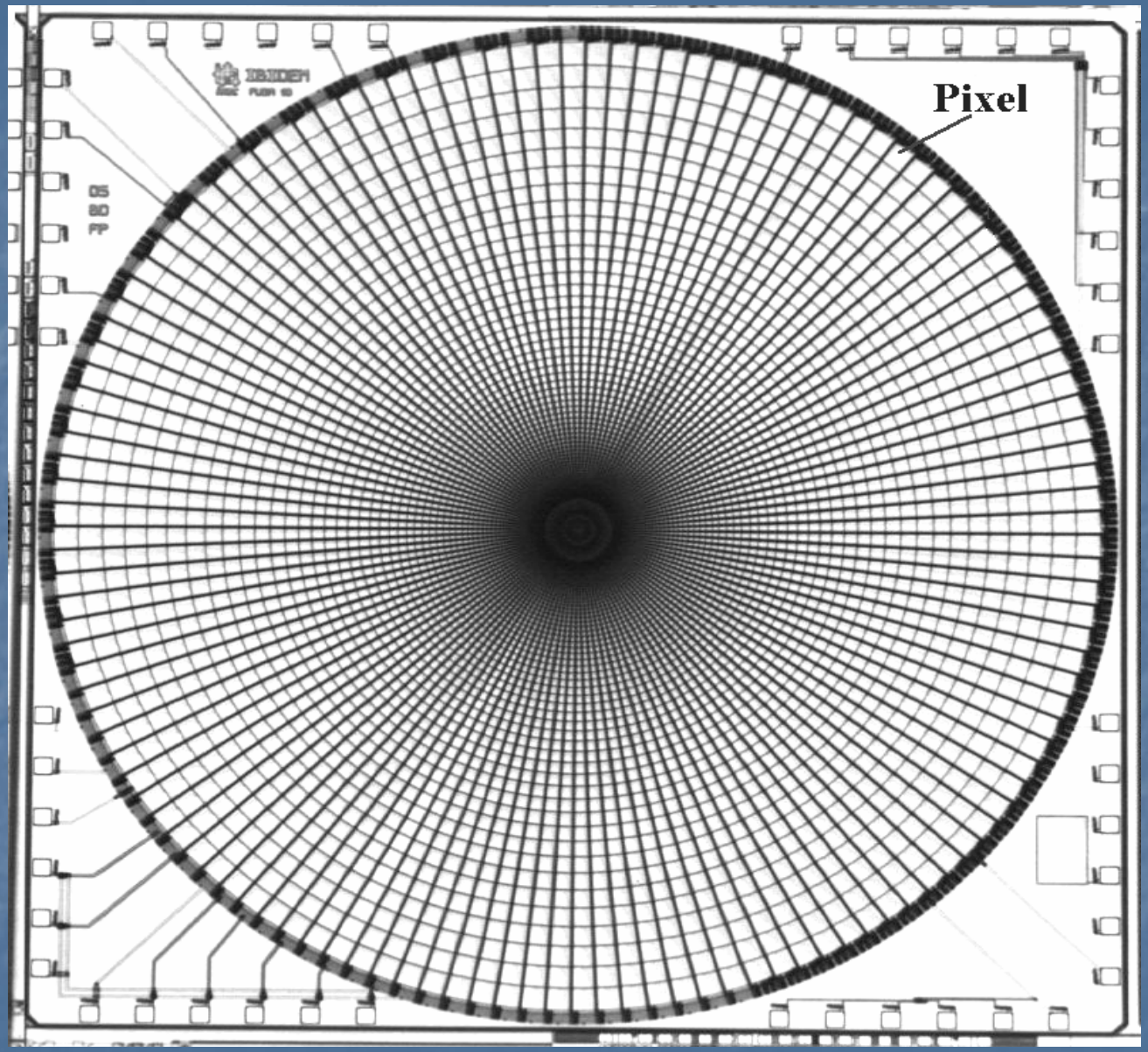


Architecture générale d'une matrice APS



- Matrices NxM
- Décodeurs X et Y
- Circuit de lecture colonne
- Beaucoup de circuits logiques
- « re-use » des bibliothèques utilisées pour faire de la RAM et du CPU

APS – formes de matrices

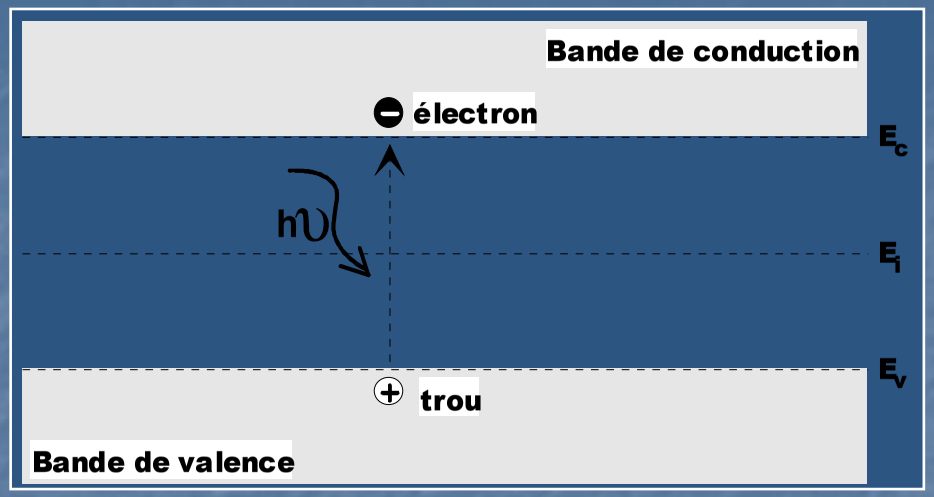


Impossible à réaliser en techno CCD

Les avantages de l'APS

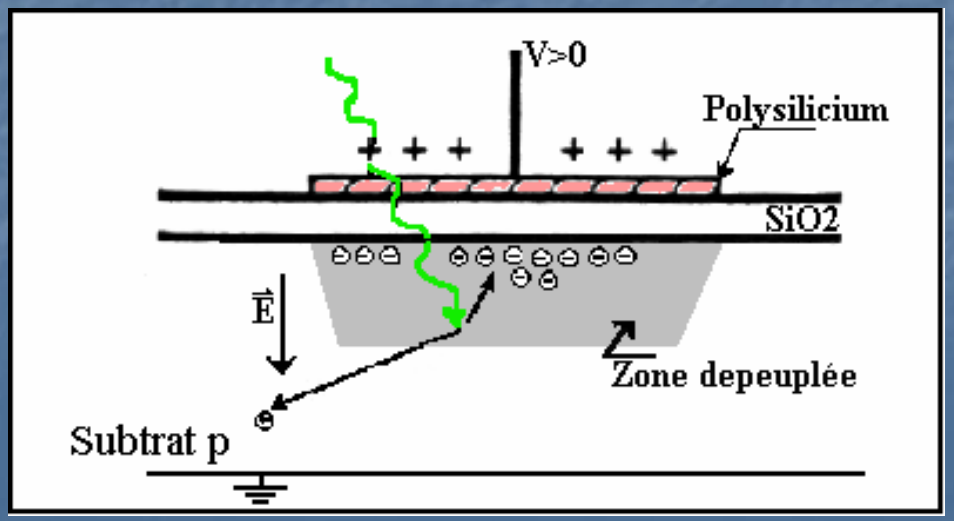
- Pas de transfert de charges à effectuer :
  - Moins sensible aux pixels défectueux que le CCD
  - Pas d'éblouissement
  - Rendement de fabrication plus élevé
- Accès aléatoire, lecture non destructive
- Utilise la technologie CMOS :
  - Coût inférieur (20 à 60% / CCD)
  - Bibliothèque importante : « boite noire », VHDL
  - Tension : 2,5 à 5V (consommation 3 à 100x - / CCD)
  - Vitesse de lecture élevé
  - Réduction de lithographie menée par les fabricants de mémoires, c'est une retombée directe pour la taille du pixel et le facteur de remplissage.

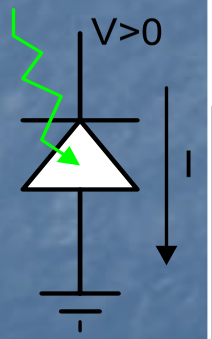
Détection de la lumière par le silicium



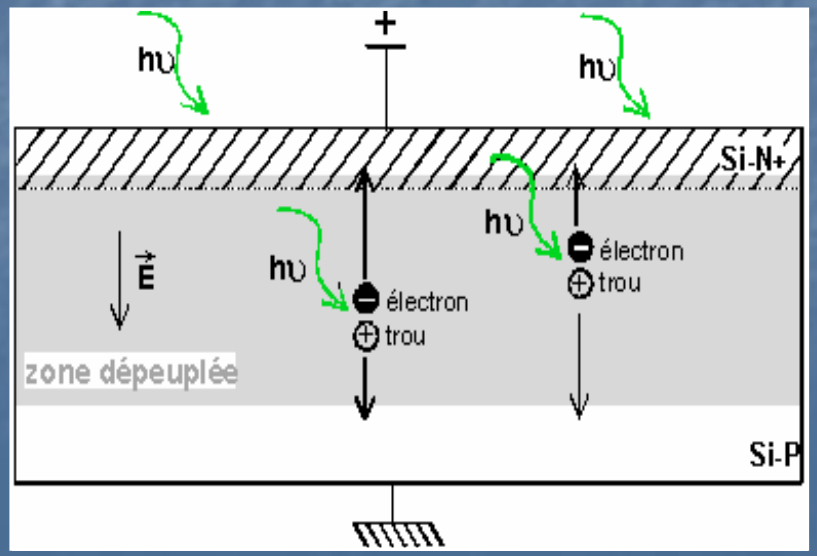
Eg=1.12 eV
$\lambda c \leq 1.1\mu m$

PhotoMOS/PhotoGate

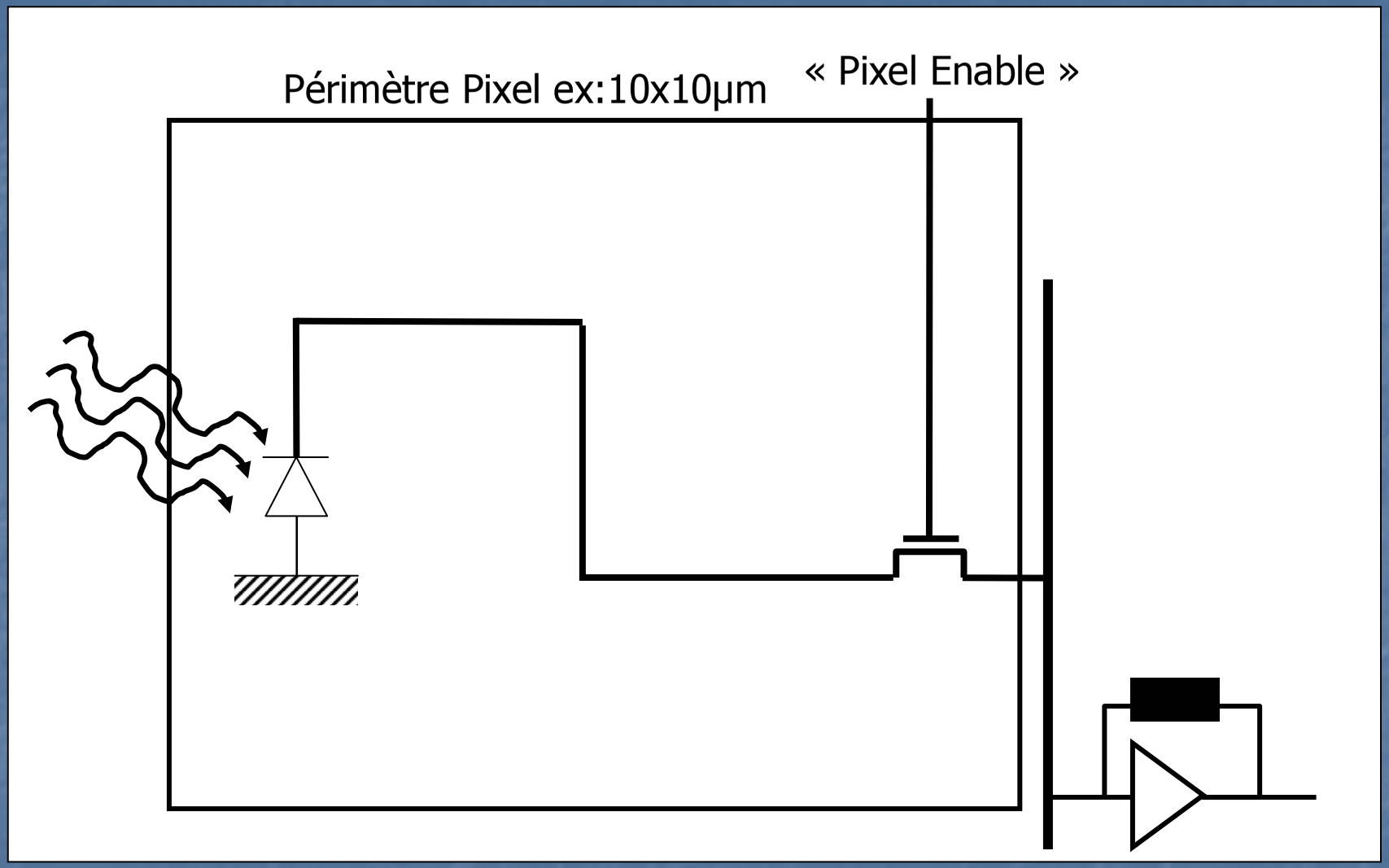




PhotoDiode



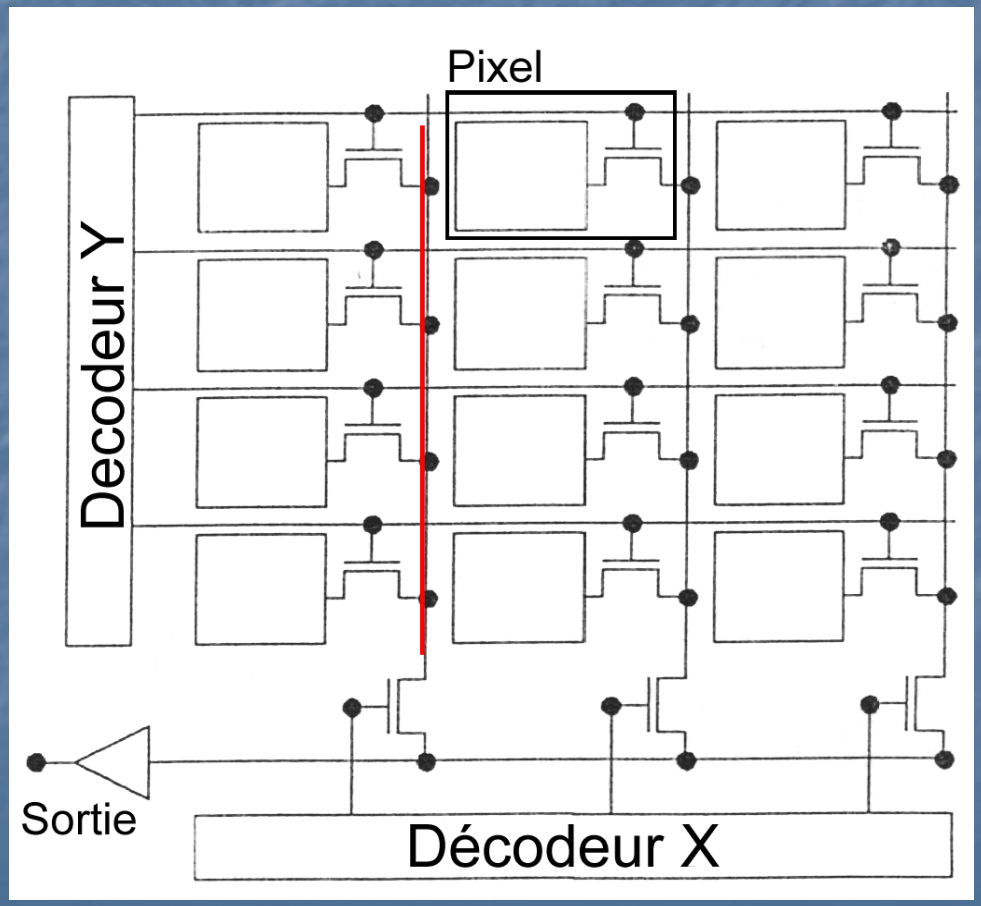
Architecture de pixel CMOS « passif »



- Pas de transistor buffer dans le pixel
- Un seul transistor de switch ou de sélection par pixel

Le capteur d'images

- **Capteurs Passive Pixel Sensors (PPS ou XY-MOS)**

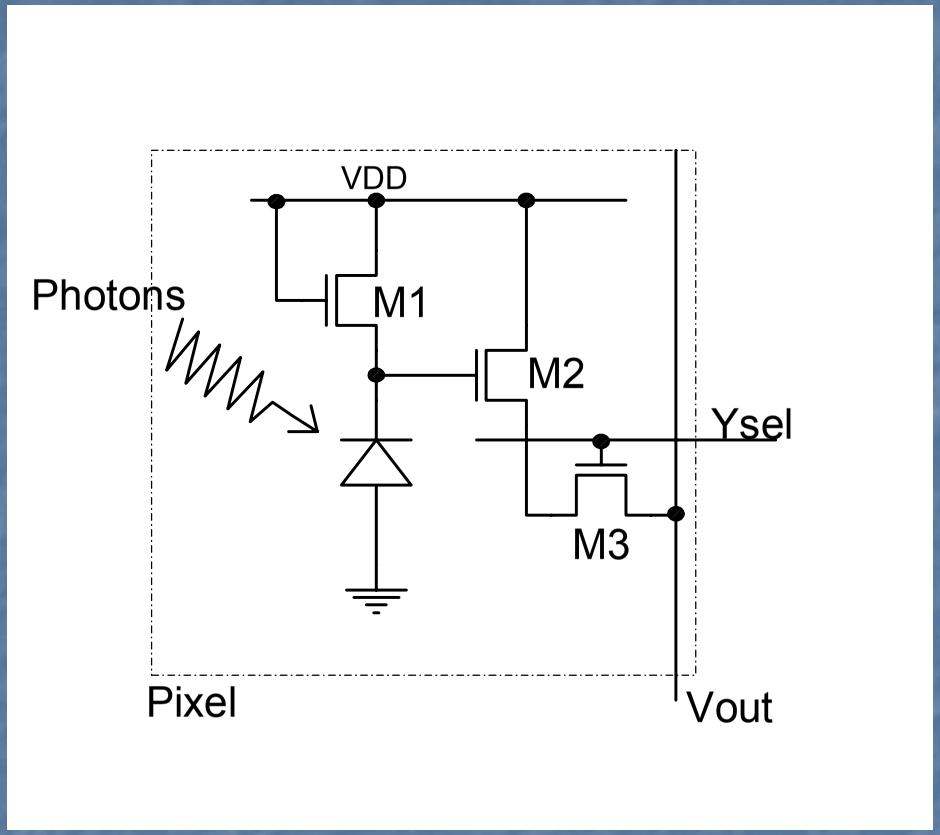


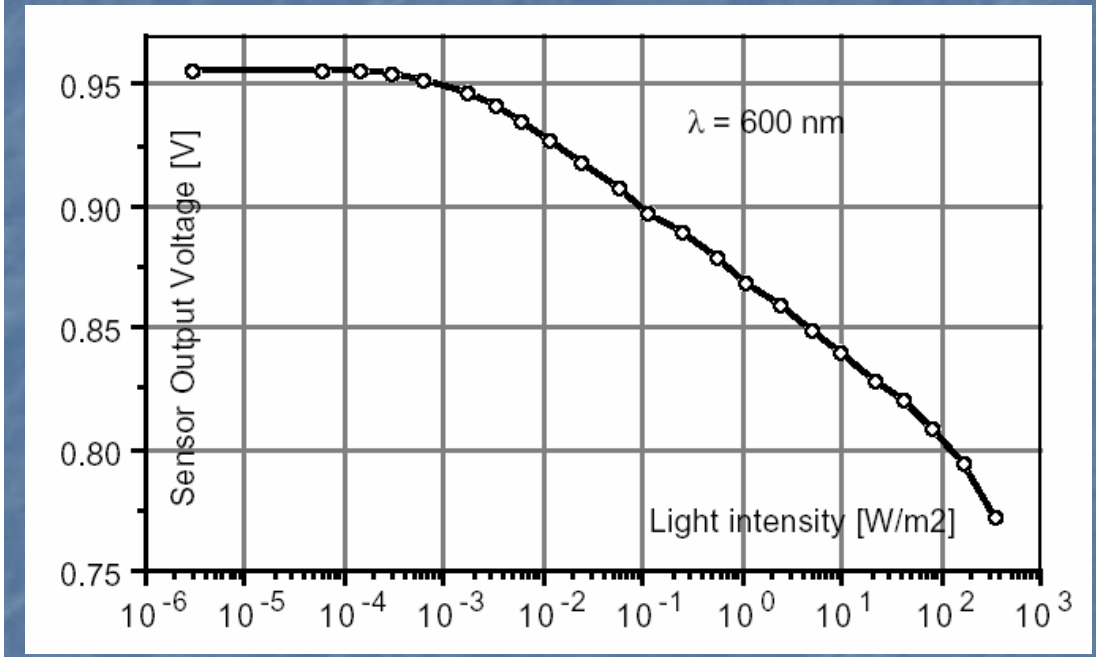
- Avantages
  - Fill Factor élevé
  - Economique
  - lecture
    - Aléatoire
    - Non destructive

- Inconvénients
  - Pas d 'amplification
  - Bus colonne à haute impédance
  - Bruit fixe et temporel élevé
  - Performances très médiocres comparé aux CCD

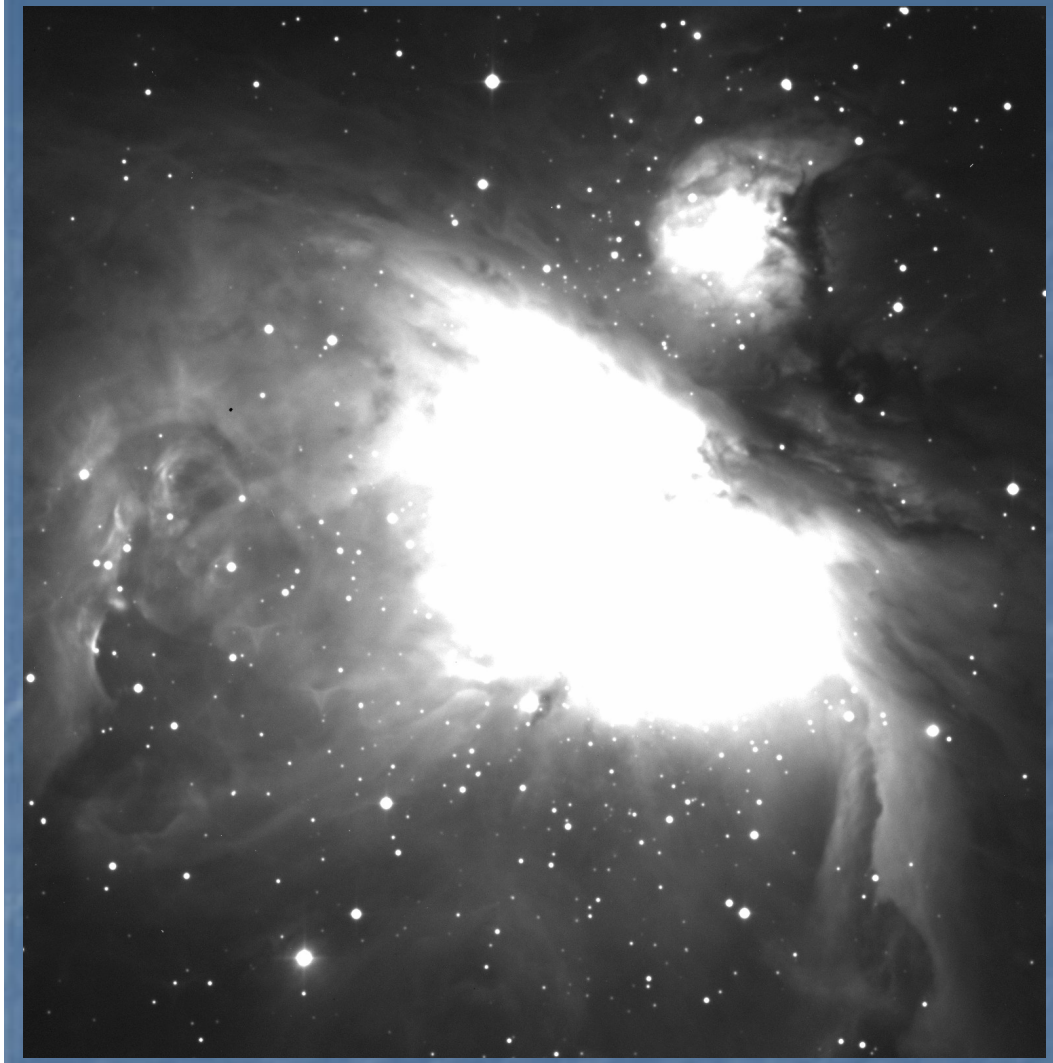
Les pixels d'un APS

- Pixels photodiode en mode courant, 3 transistors





- Réponse non linéaire V α log(I), dynamique de 100 dB
- Sensible aux variations de tensions de seuils M1 (0.1V) : PRNU très médiocre
- Sensible aux variations de température, 0.15V pour 5 magnitudes
- Reproduit la réponse log de l'oeil
- Bruit élevé, rémanence de 10 ms avec les faibles flux

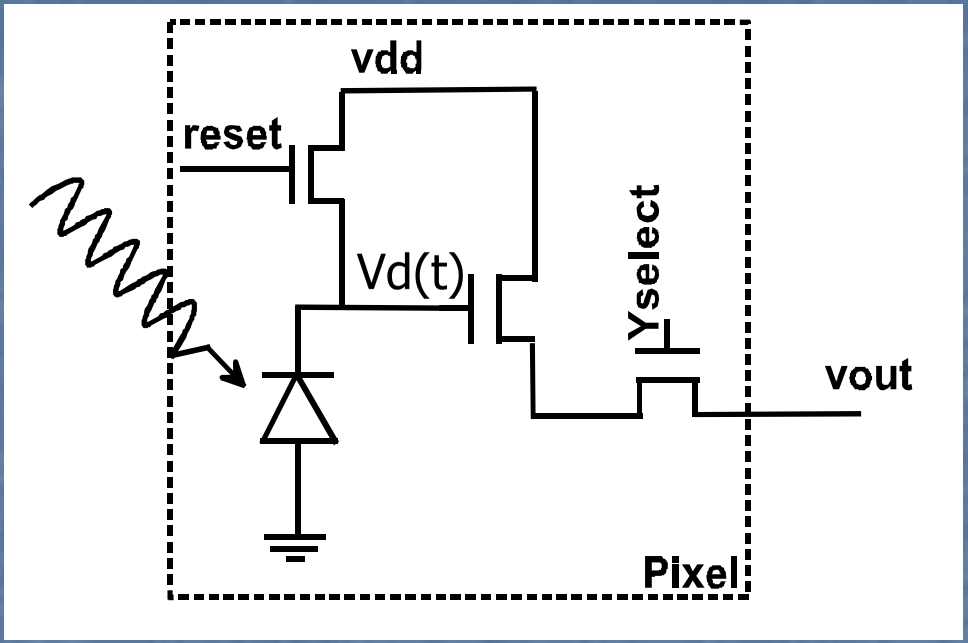


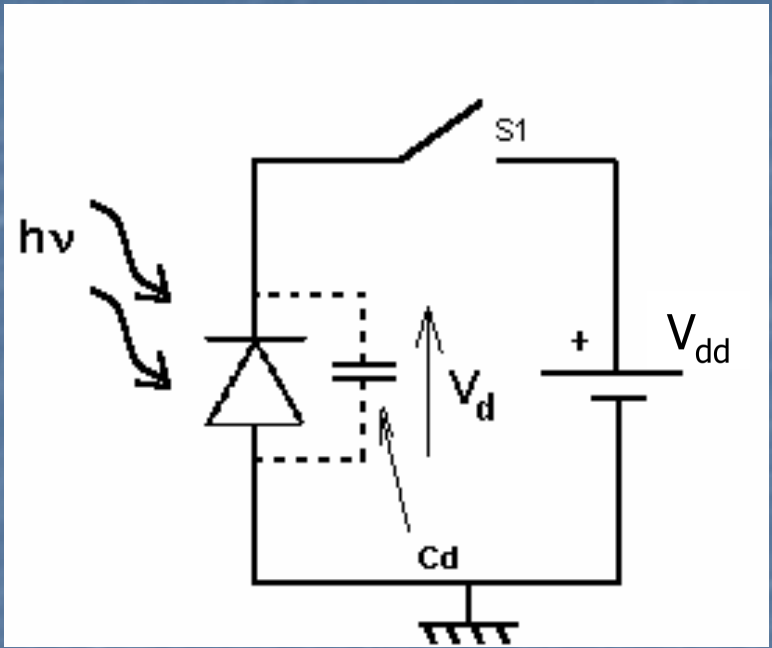
Détecteur Linéaire (et saturation)

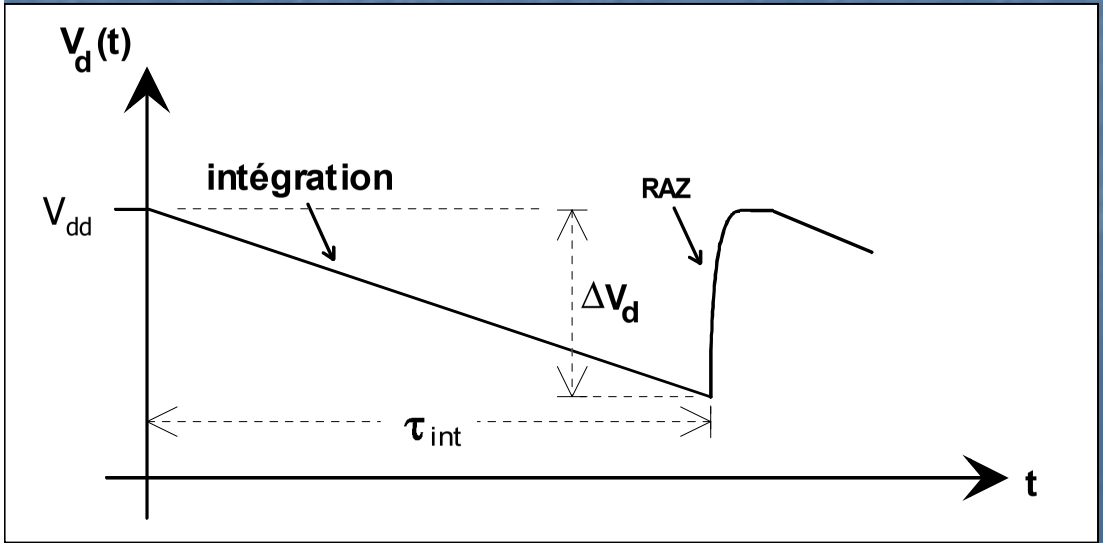
Détecteur LOG

Structures de pixels APS

Pixel photodiode à précharge







$$V_d(t) = V_{dd} - \frac{1}{C_d} \cdot \int_0^t I_{phot}(u) \cdot du$$

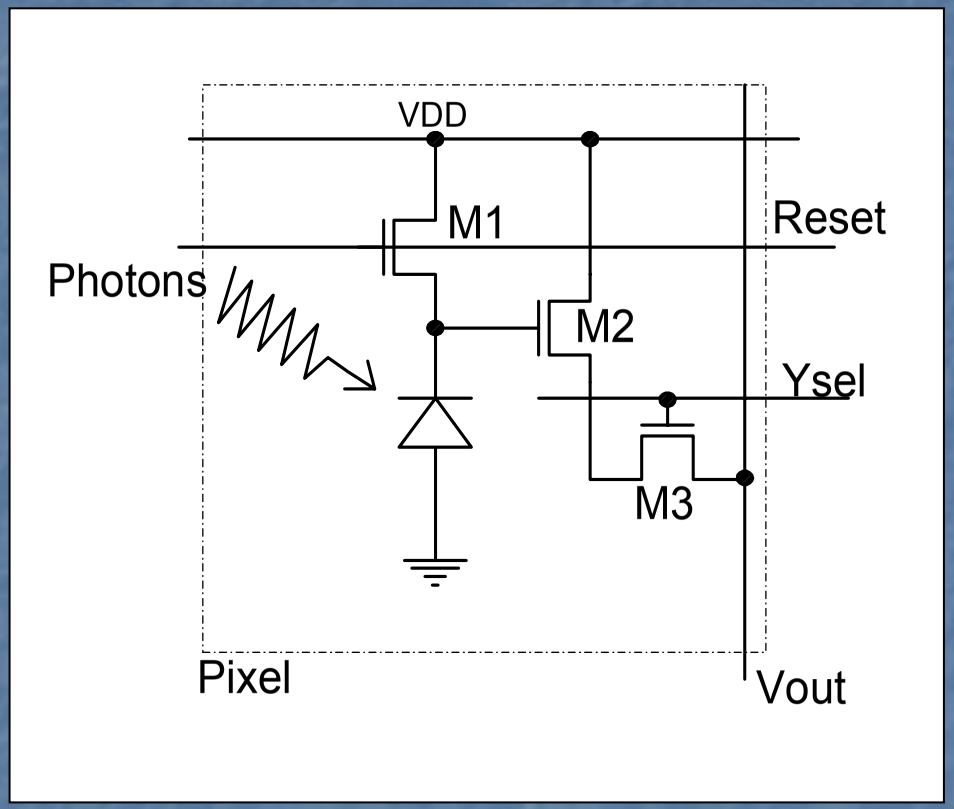
Cd : capacité de la diode
I phot : courant photonique

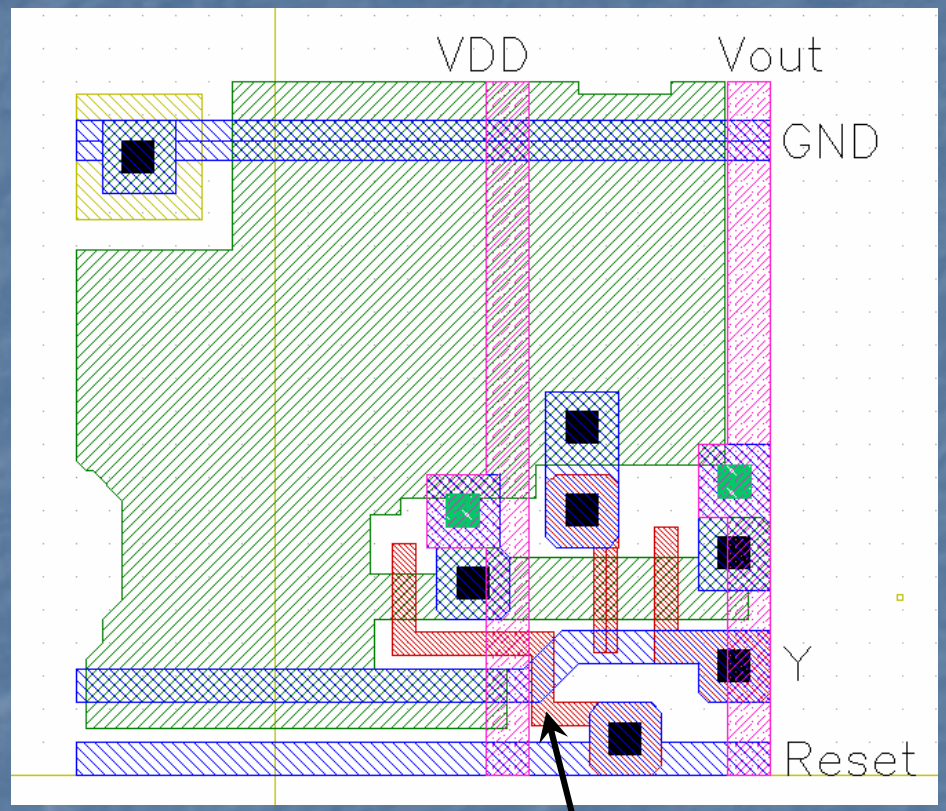
Vout = G * Vd
G ~ 0.8

Les pixels d'un APS

Photodiode en mode pré-charge

« Layout en lithographie de 0.8µm ou vue réelle d'un pixel APS »





0.8µm de large

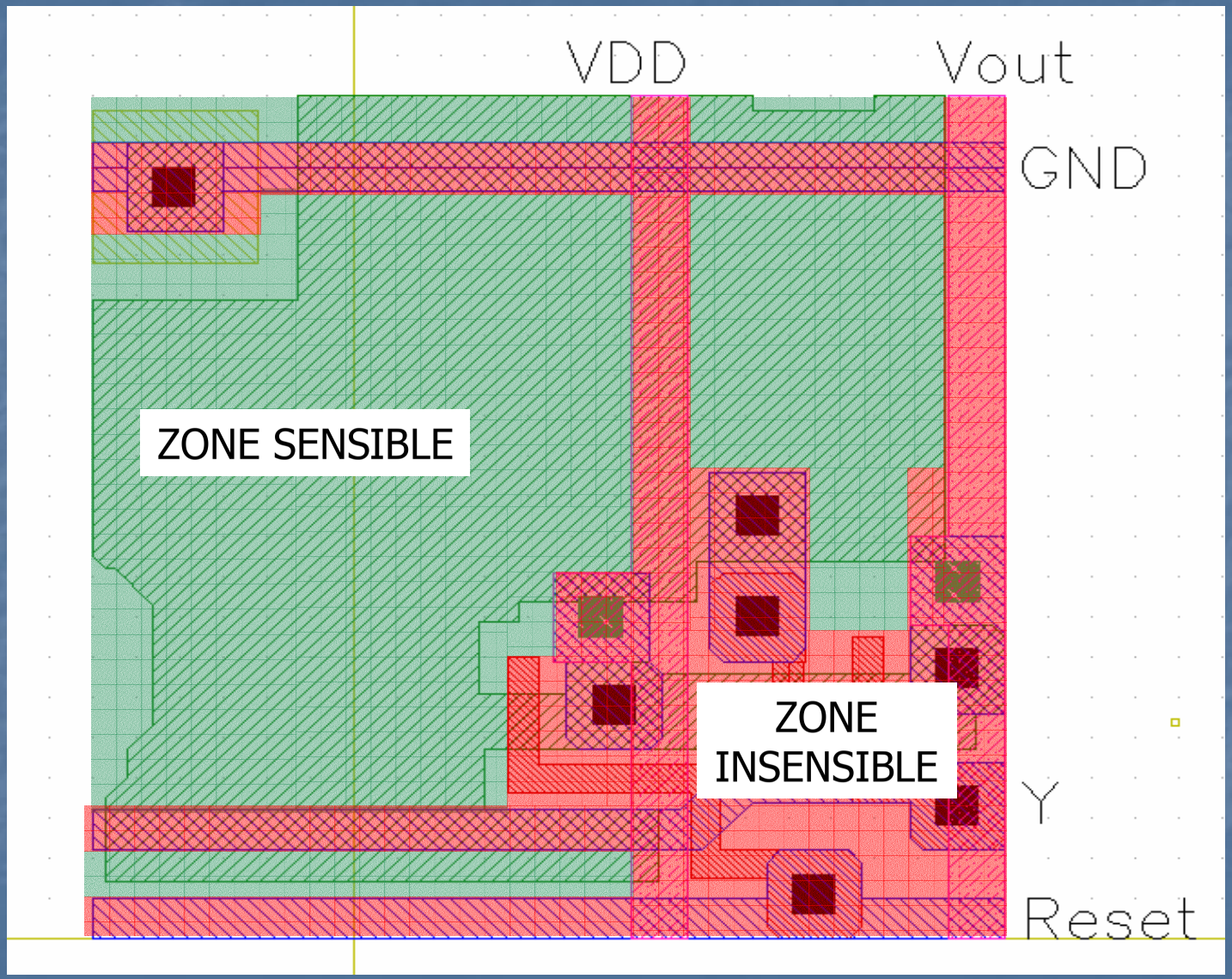
Avantages :

- Sensible dans le bleu
- Facile à réaliser
- Taux de remplissage élevé

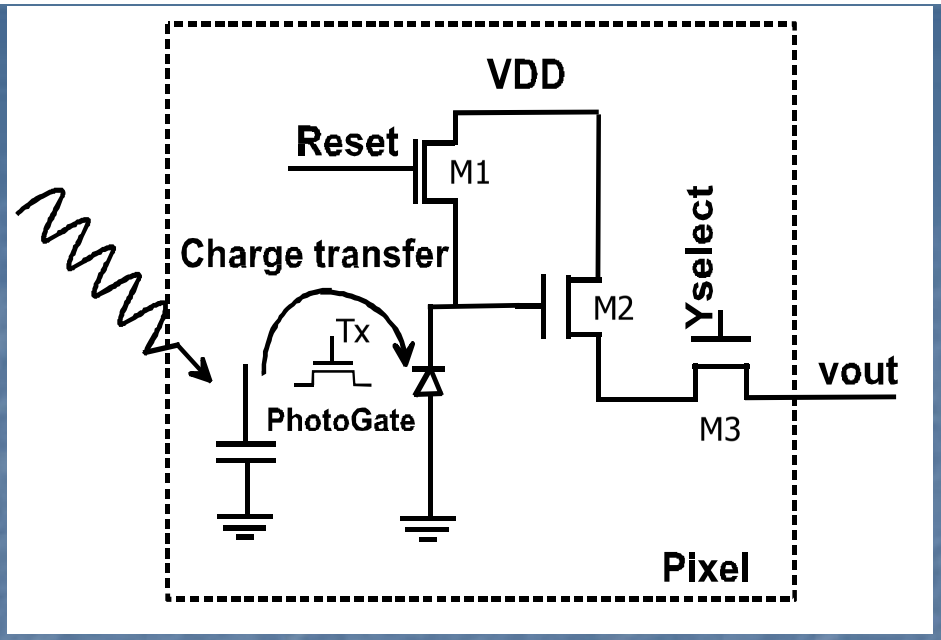
Inconvénients :

- KTC non éliminé
- Faible facteur de conversion

Facteur de remplissage d'un APS

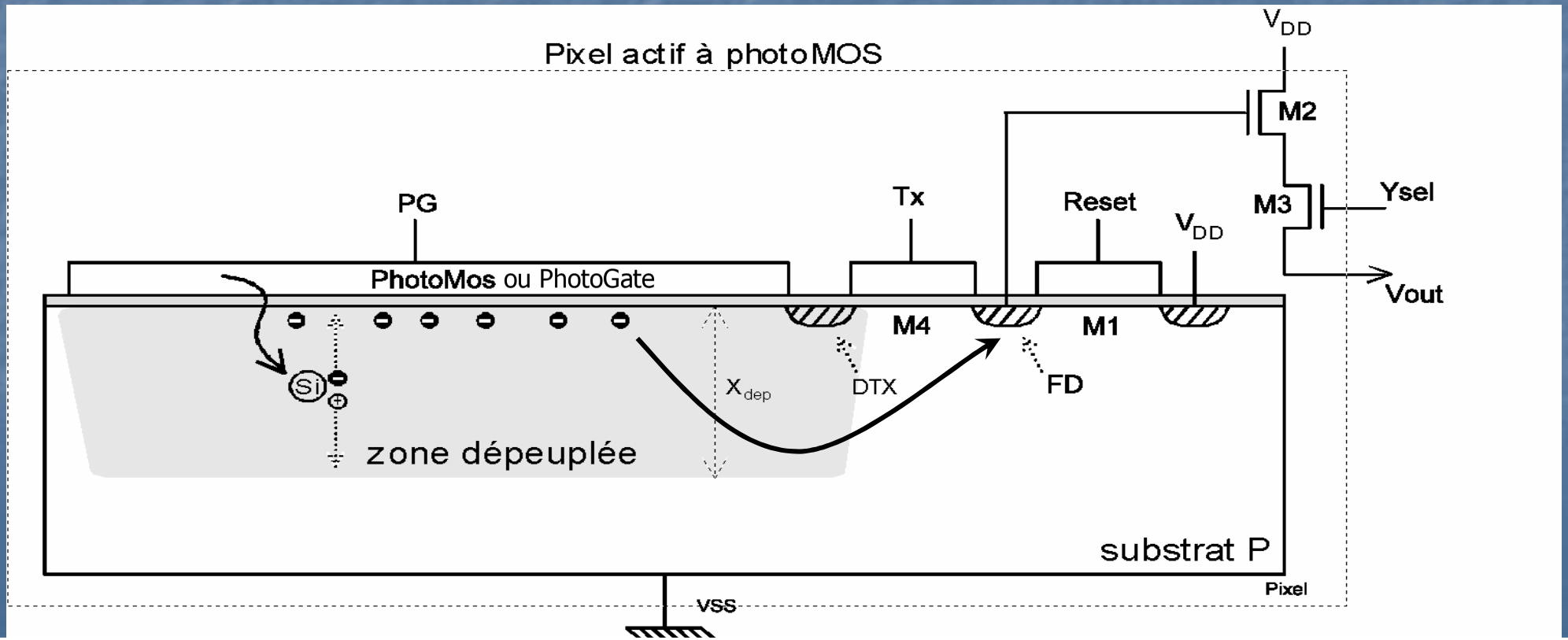


Ici : 65% de fill factor…

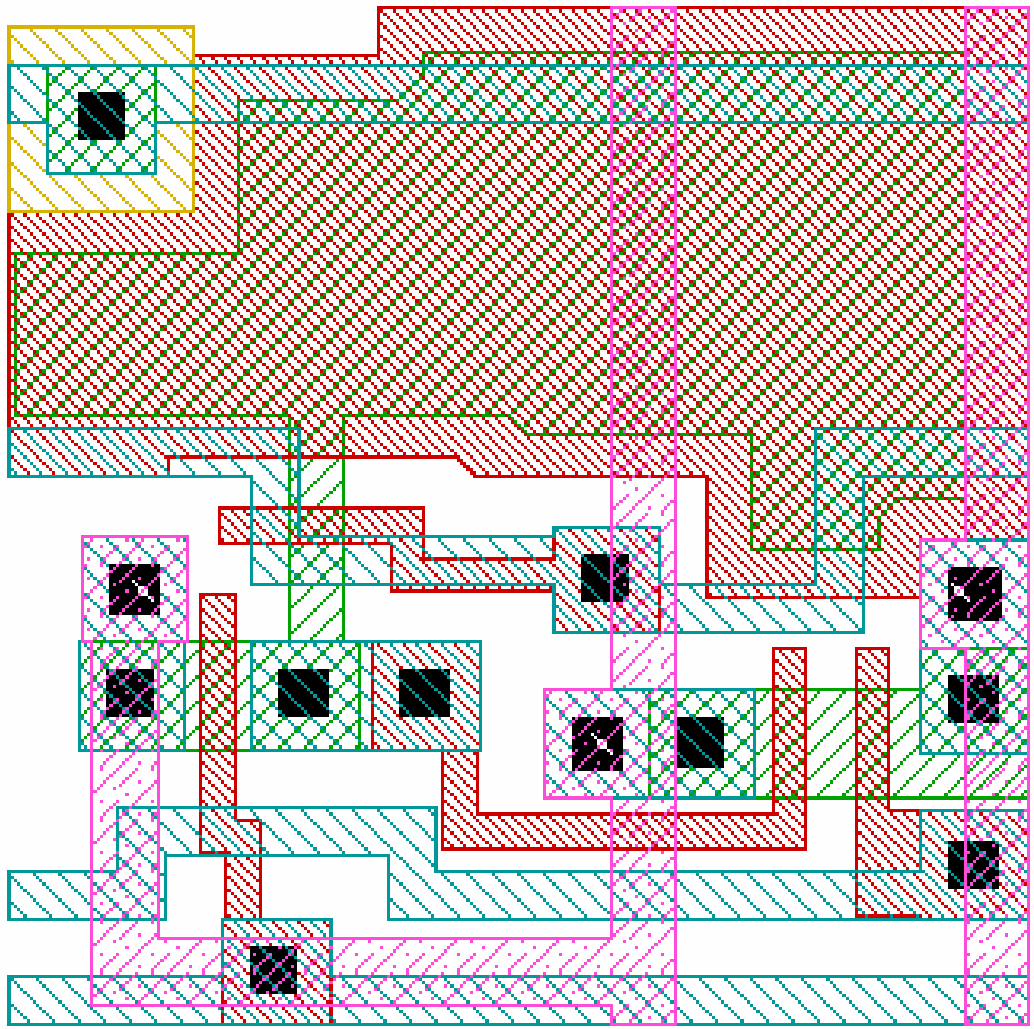


Pixel PhotoMos/Photogate

- Diode de lecture découplée
- Ressemble à un CCD
- Rendement affaibli dans le Bleu
- Non affecté par le bruit KTC
- Fill factor moins bon que Photodiode



Les pixels d'un APS (PhotoMos)



Avantages :

- Facteur de conversion élevé
- Ktc éliminé par le CDS

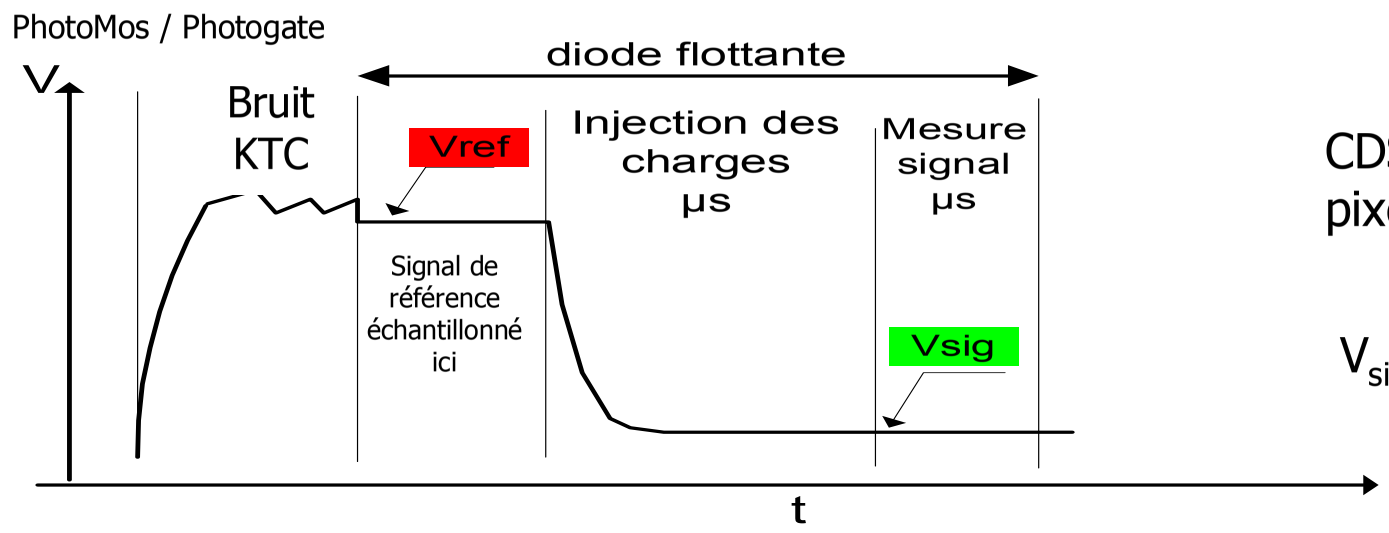
Inconvénients :

- Peu sensible dans le bleu
- Taux de remplissage plus faible

« Layout » techno 0.8 µm
Pixel 20x20µm

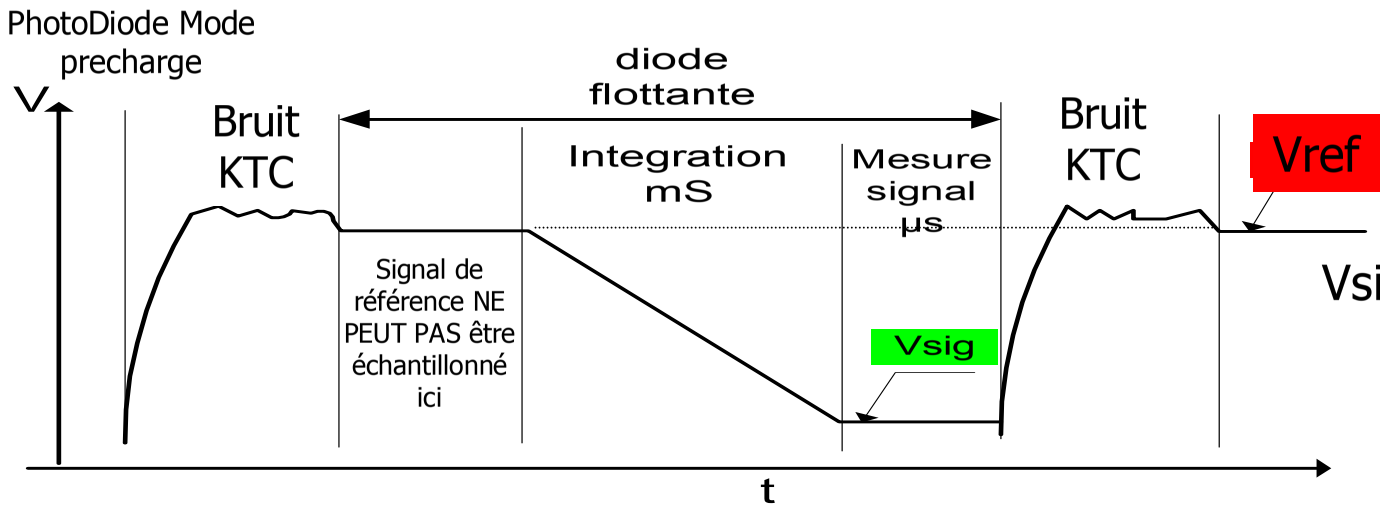
Techno :
Double métal
Simple Poly

Lecture PhotoMos/Photodiode



CDS appliqué au pixel photoMos

V_{signal}= Vref - Vsig

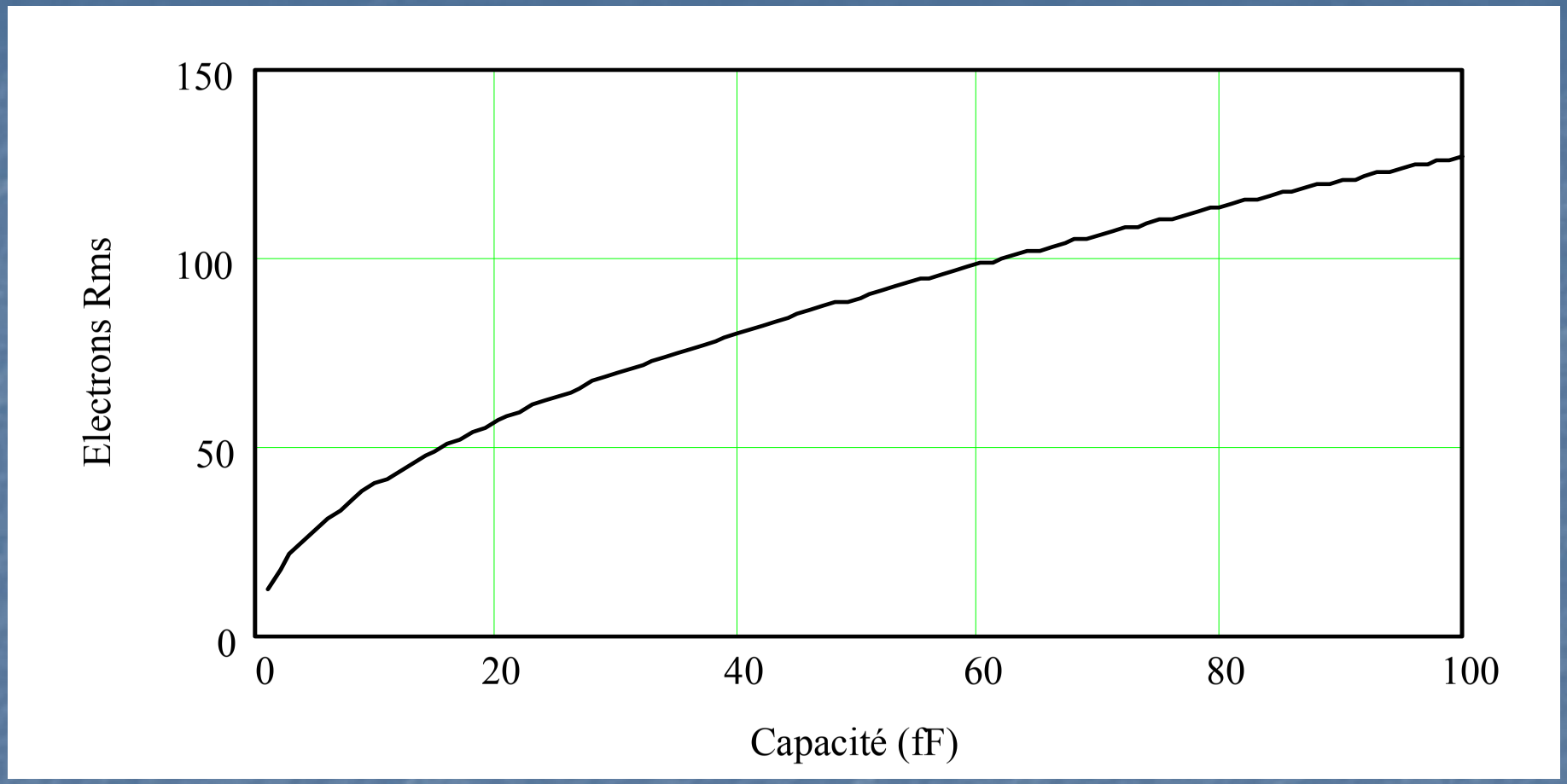


Vsignal= Vref – Vsig + KTC

CDS non applicable au pixel photodiode

Bruit KTC, éliminé par le « Correlated Double Sampling (CDS)»

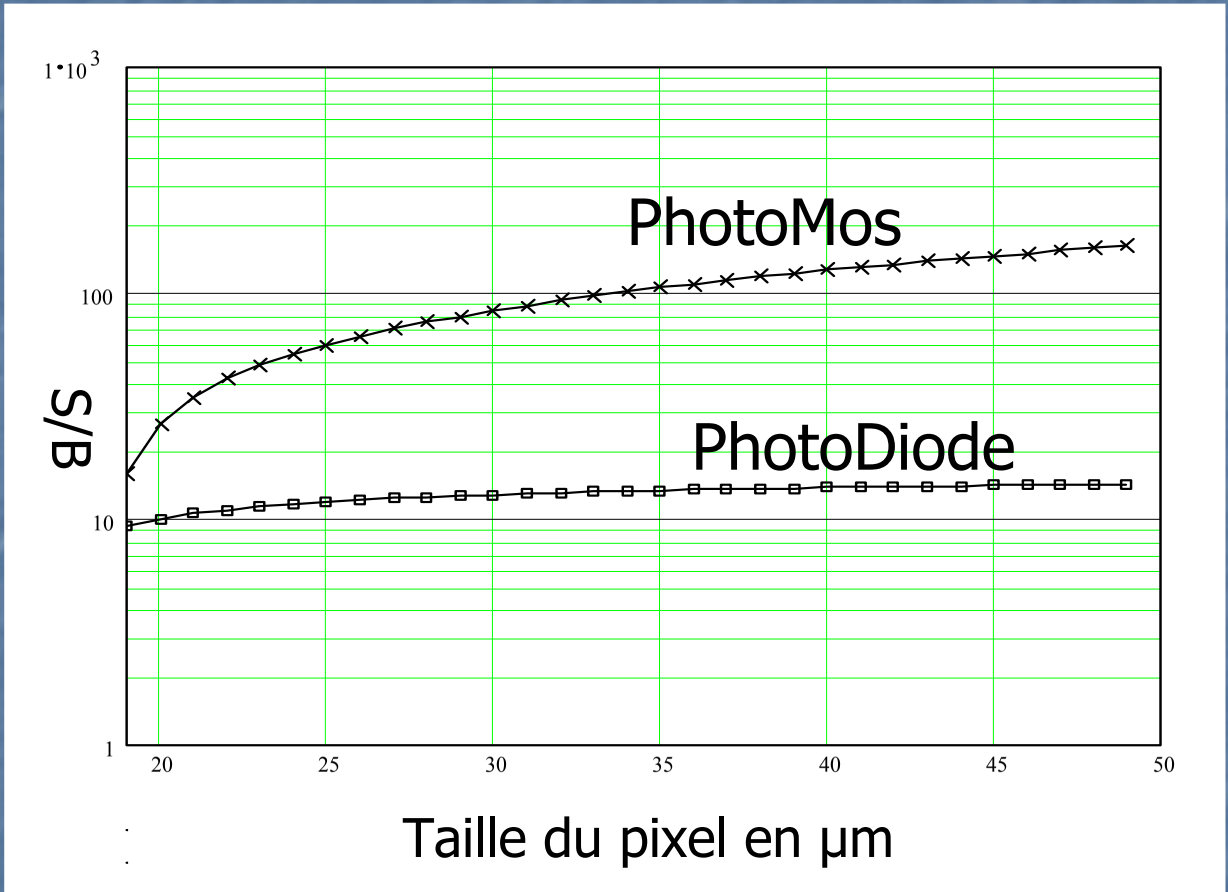
Bruit KTC



$$\overline{\Delta n} = \frac{C_d \cdot v_n}{q} = \frac{\sqrt{k \cdot T \cdot C_d}}{q}$$

C_d : capacité parasite de la diode de lecture

Etude du rapport Signal/Bruit entre le pixel photodiode photoMOS



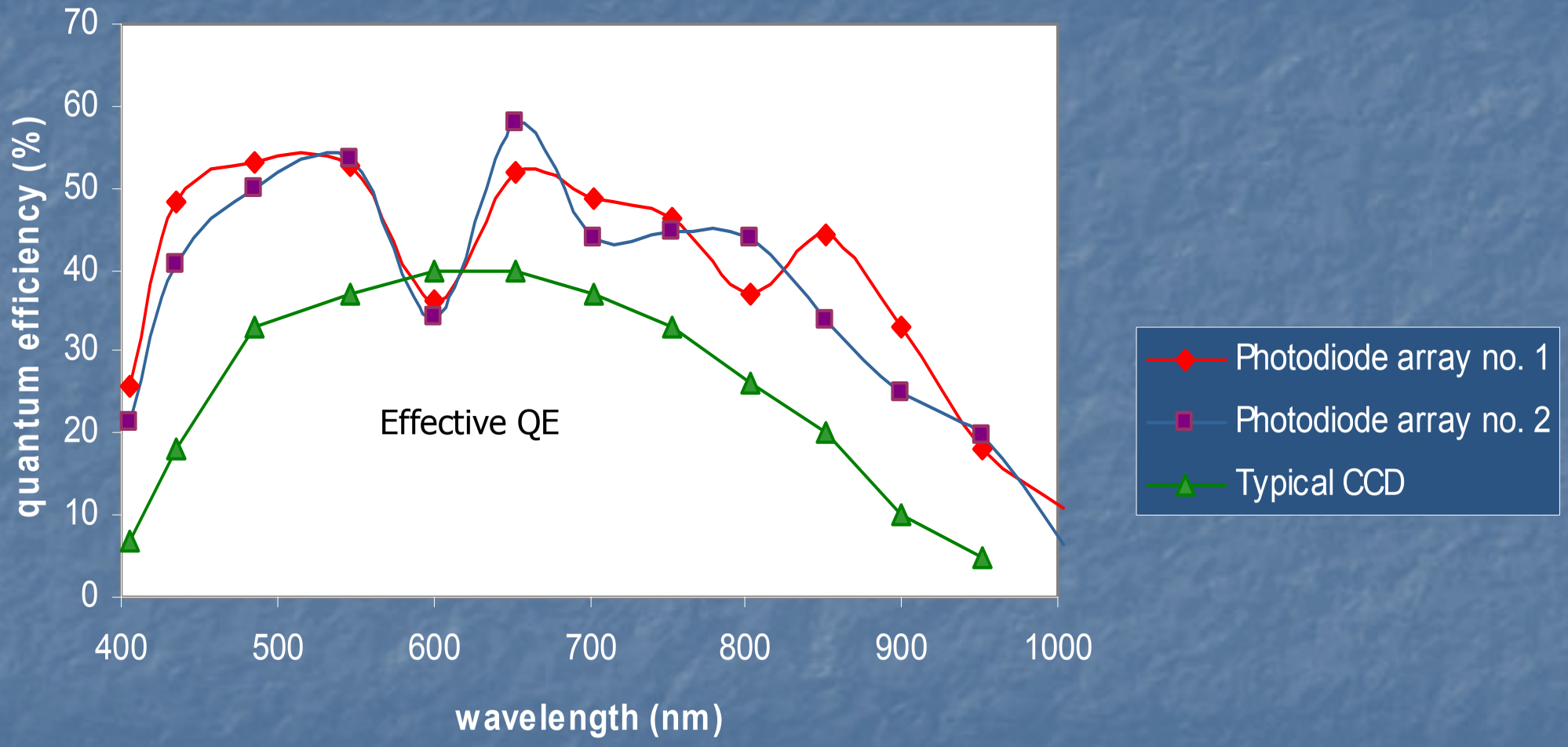
- 1.6 x plus de surface <u>non sensible</u> pour le photoMos
- Facteur de conversion faible pour la photodiode

⇨Photodiode moins sensible, ∀ le pas du pixel > 20µm

Intérêt de faire de petits pixels photodiode

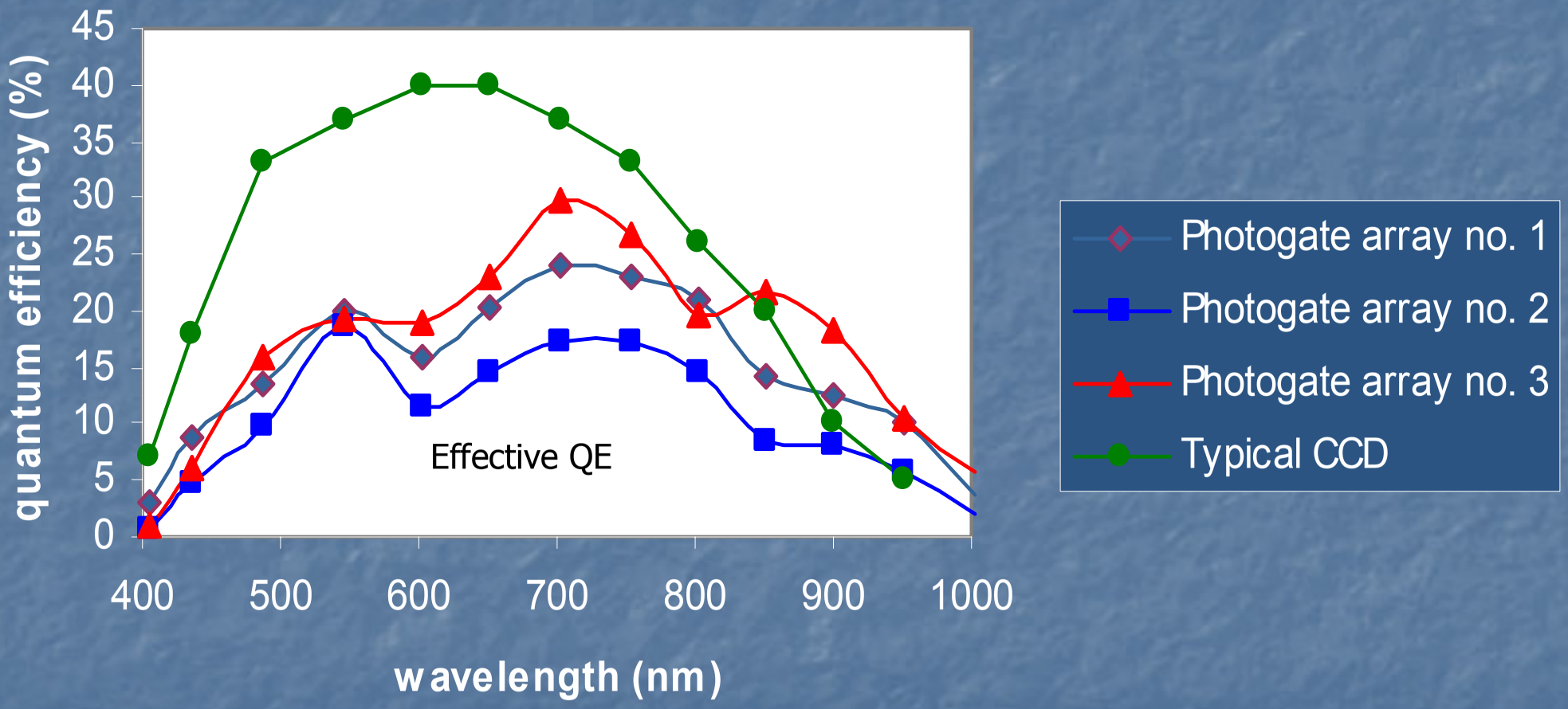
Tint= 20ms, flux = 0.1µW/cm² à 630 nm

Effective quantum efficiency - Photodiode pixels



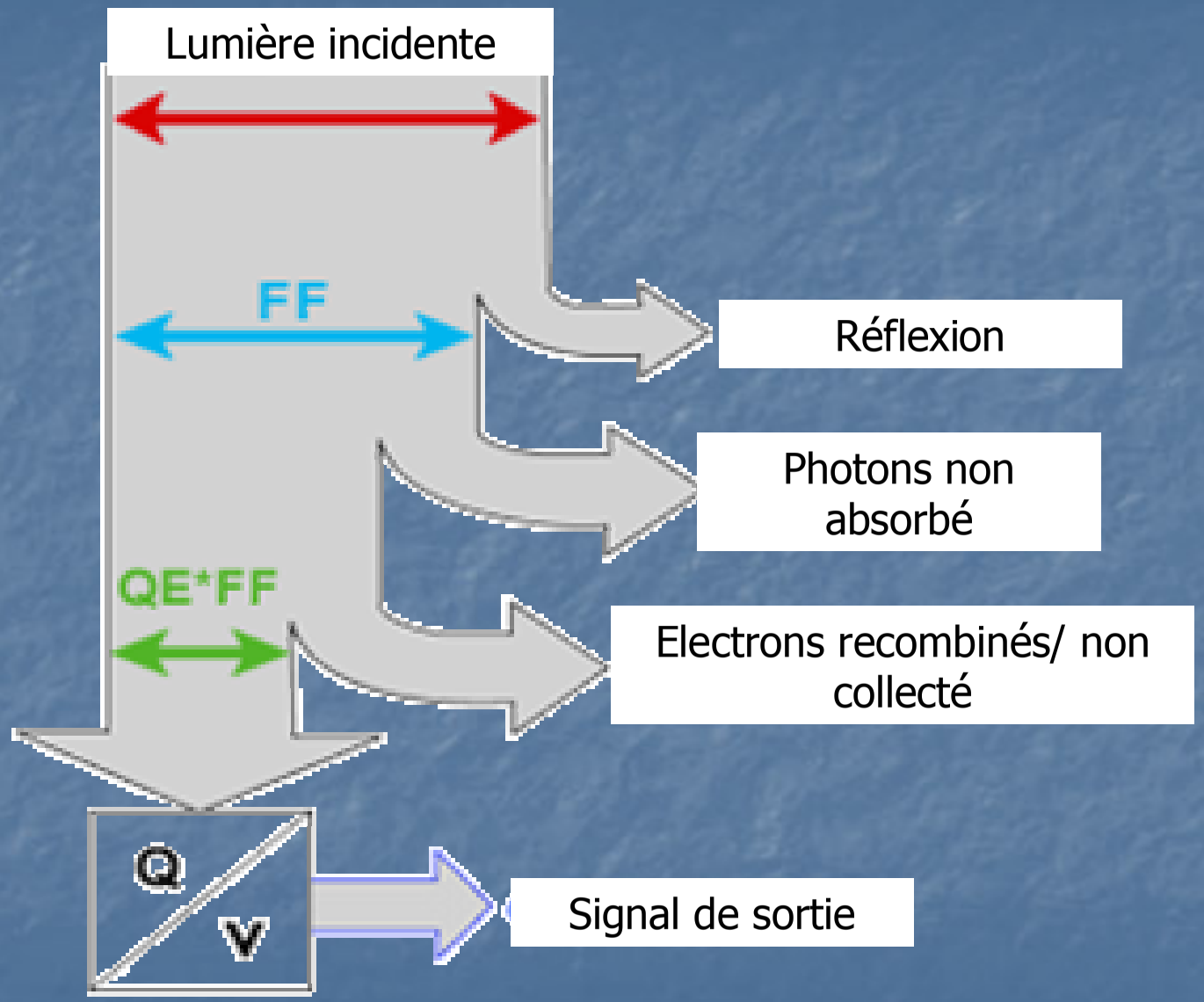
System Quantum efficiency = Fill Factor * Effective Quantum efficiency

Effective quantum efficiency - Photogate pixels

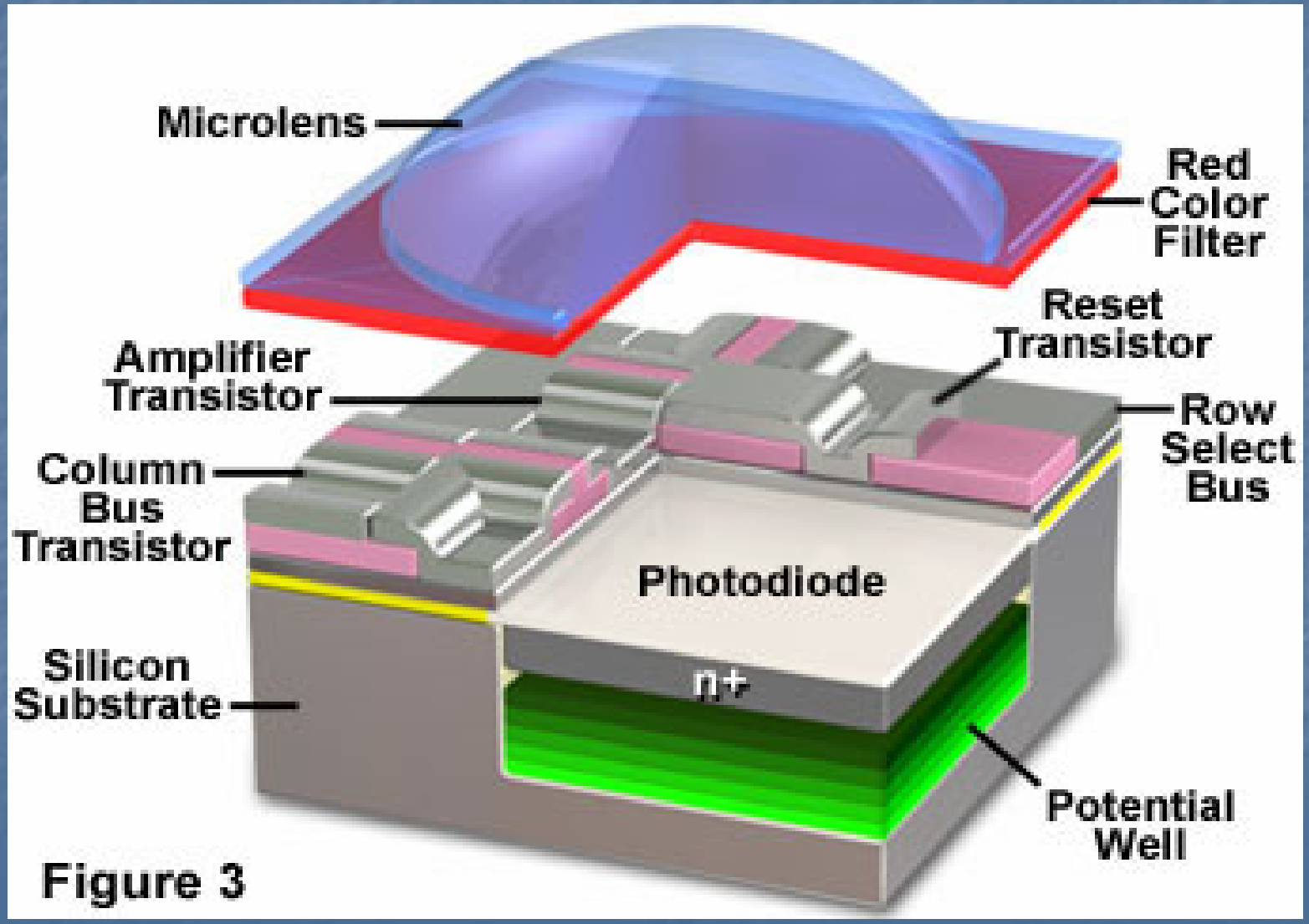


System Quantum efficiency = Fill Factor * Effective Quantum efficiency

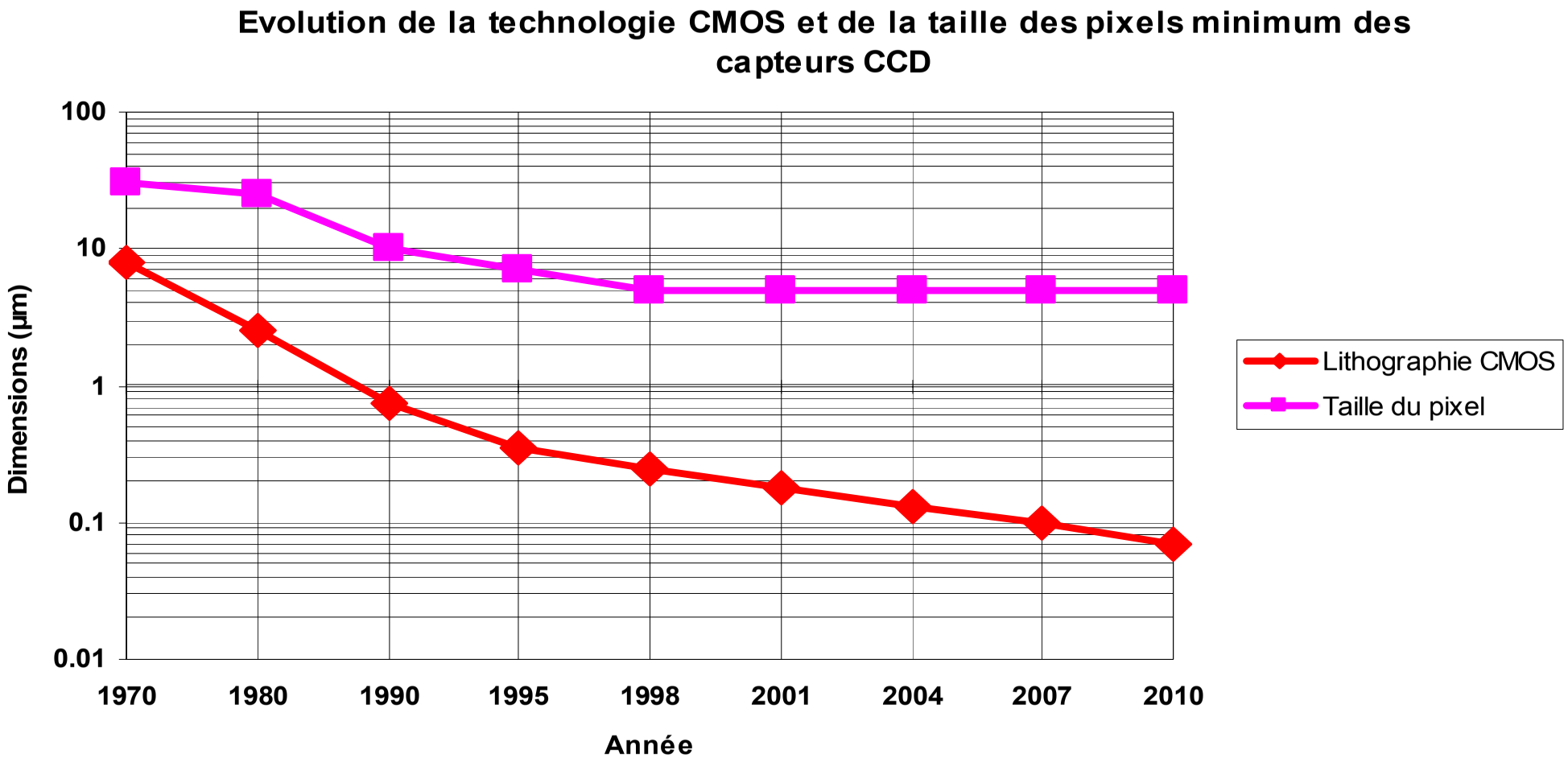
Taux de remplissage (*Fill Factor*)



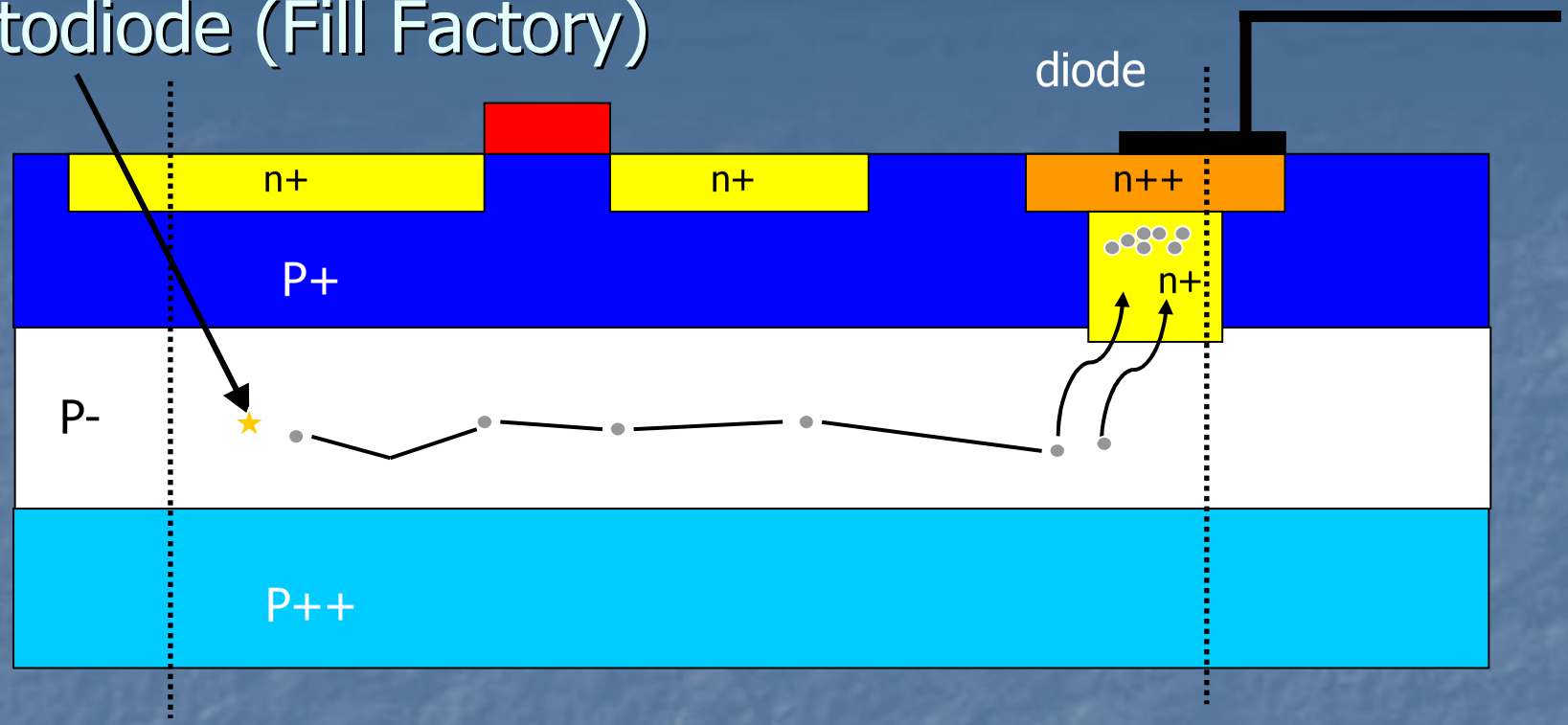
Pixel APS photodiode en 3D et µlentilles

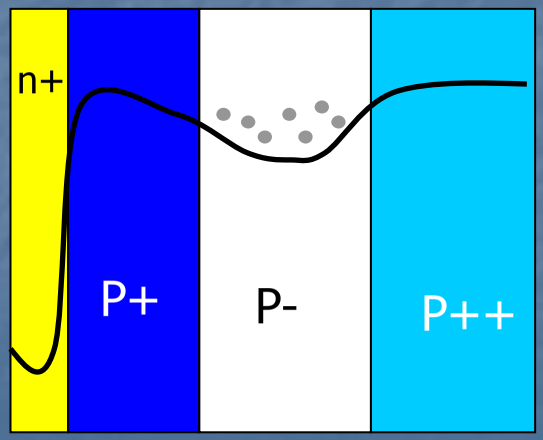


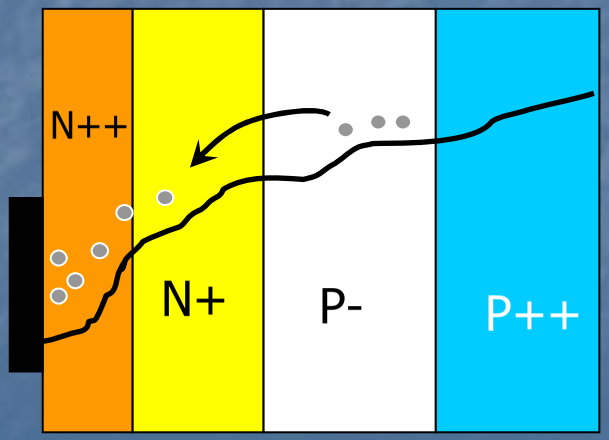
Lithographie et taille de pixels



Pixel Photodiode (Fill Factory)







Optimisé pour le NIR

Mesures de performances de matrices APS

- Paramètres qui se trouvent sur les datasheet des détecteurs
- Très comparable à ce qui est fait en CCD
- Bruit fixe en plus
- Efficacité de transfert de charge en moins
- Rendement quantique
- Facteur de conversion
- Bruit
- Linéarité
- Dynamique
- FTM
- Etc etc …

Facteur de conversion

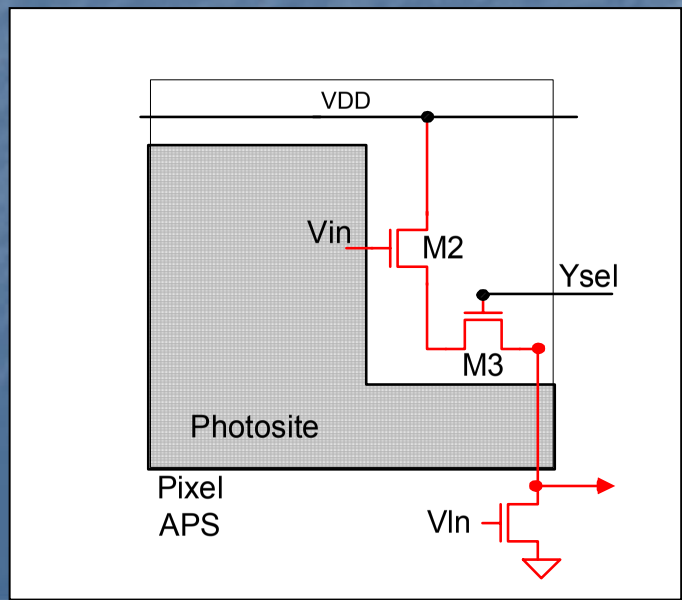
Matrice	Capacité de la diode de lecture (fF) (Estimée)	Capacité de la diode de lecture (fF) (Mesurée)	CVF ($\mu V/e^-$) Mesuré
photodiode32x32	485	496	0.2
photoMOS32x32	6.3	8.5	11
photodiode 128x128	55	62	1.6
photoMOS 128x128	7.9	8.5	11
photoMOS 256x256	17	16	6

- Ecart important entre pixel photodiode/photoMos.
- PhotoMOS :
  - La diode de lecture du PhotoMOS peut être ajusté pour l'application
  - Le facteur de conversion doit tenir compte de capacités parasites

Linéarité et Q_{max}

Matrice	Linéarité (%)	Tension de sortie correspondante (V)	Q_{max} Nbre d'électrons correspondant (e^-)
Photodiode 32x32	98.8 97 88	0.66 0.86 1.24	3.3M (1) 4.3M (1) 6.2M (1)
PhotoMOS 32x32	99.2 94.5 89.2	0.84 1.28 1.46	76K (1) 116K (1) 134K (1)
PhotoMOS 128x128	98.5 98	0.56 0.85	51K (1) 77K (2)
Photodiode 128x128	98.5 98	0.64 0.96	400K (1) 600K (2)
PhotoMOS 256x256	98.8	0.54	90K (1)

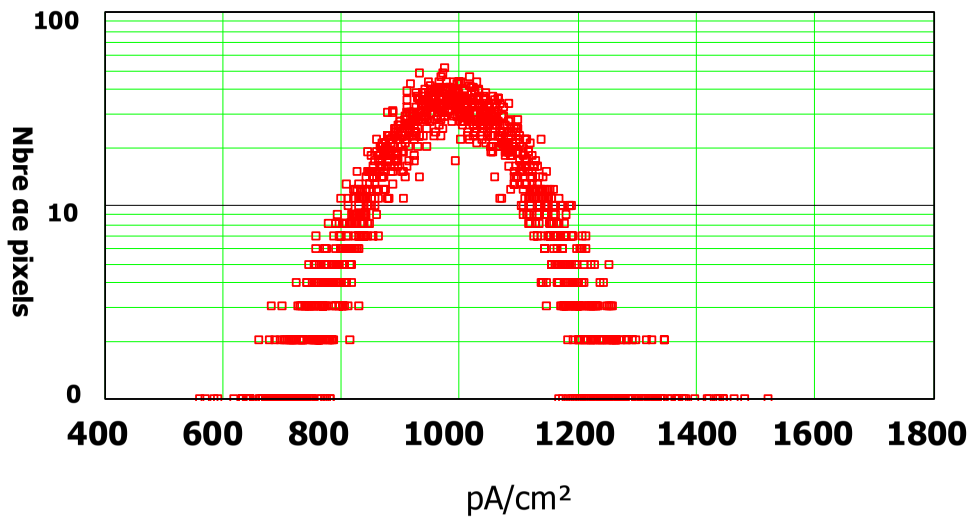
- Linéarité limité par le transistor suiveur du pixel
- Qmax PhotoMos << Qmax réel
- Pixel photoMos désavantagé par son facteur de conversion élevé
- CCD : linéarité de 2V et 500Ke-

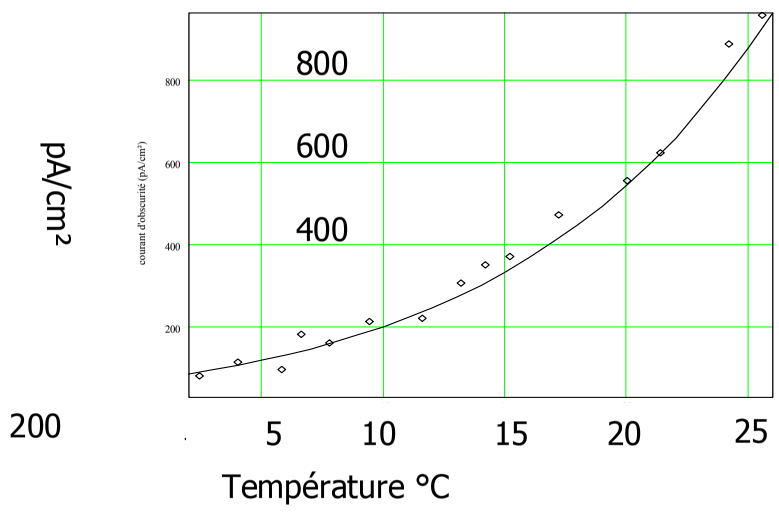


Courant d 'obscurité

Matrice	Photodiode 32x32	PhotoMos 32x32	PhotoDiode 128x128	PhotoMos 128x128	PhotoMos 256x256
Courant	380 pA/cm²	152 pA/cm²	1 nA/cm²	1 nA/cm²	2.4 nA/cm²
DSNU	95%	82%	71%	98.6%	99.8%

à 25°C



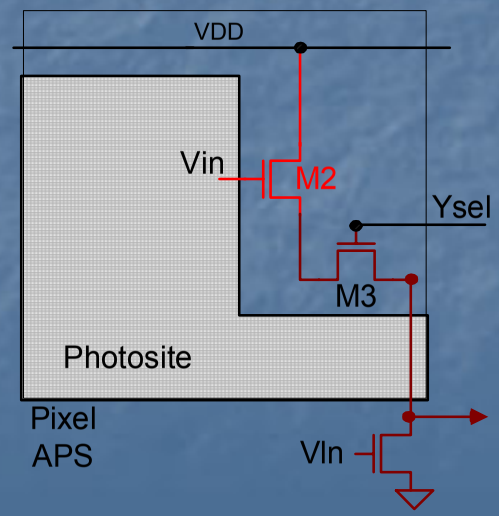


- Valeurs variant entre 0.15 et 2 nA/cm² (CCD MPP 20 pA/cm²)
- dépend du dessin du pixel et de la technologie
- « Dark Signal Non Uniformity » très bonne pour les pixels PhotoMos (6% RMS)
- Le courant mesuré double tout les 6° C

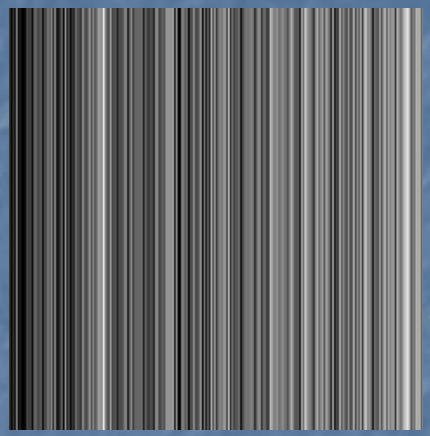
Bruit et dynamique

Matrice	µV rms	Vitesse de lecture	KTC e- résiduel	Total Electrons RMS
Photodiode32x32	160	250 kpx/s	50µm² 360	800
PhotoMOS 32x32	220	250 kpx/s	50µm² 0	20
PhotoMOS 128x128	154 407	50 kpx/s 1 Mpx/s	20µm² 0 0	14 37
Photodiode 128x128	225	50 kpx/s	20µm² 100	141
PhotoMOS 256x256	120	50 kpx/s	20µm² 0	20

- Contribution principale du bruit :
  - ⇨ transistor M2 et le reste du circuit.
- Dynamique de 75dB (12 bits) pour toutes les matrices à 1Mhz
- Rappel CCD : 5e-, 16 bits @50 Kpx/s

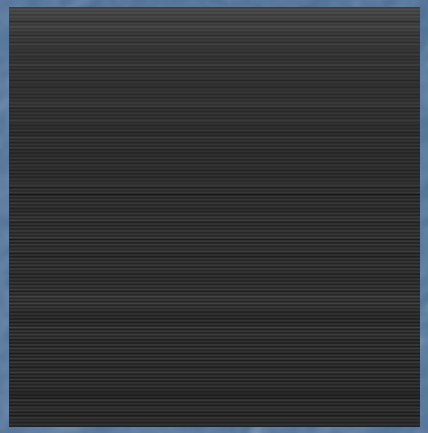


Bruit Fixe : Fixed Pattern Noise “FPN”



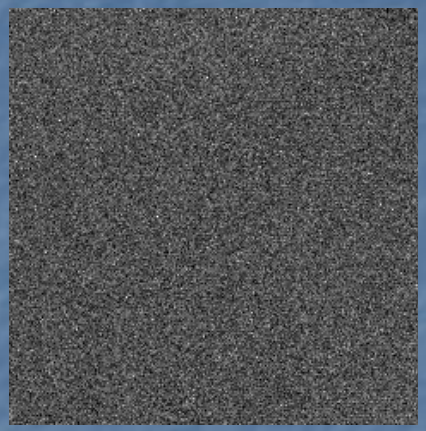
FPN colonne

+



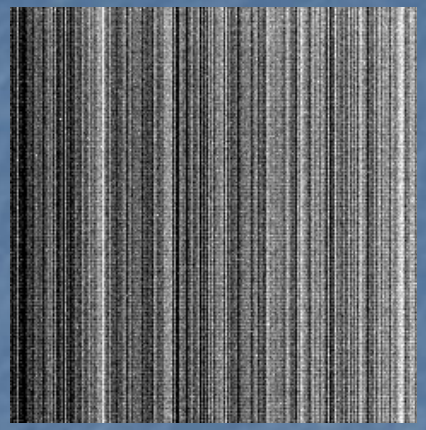
FPN ligne

+



FPN pixel

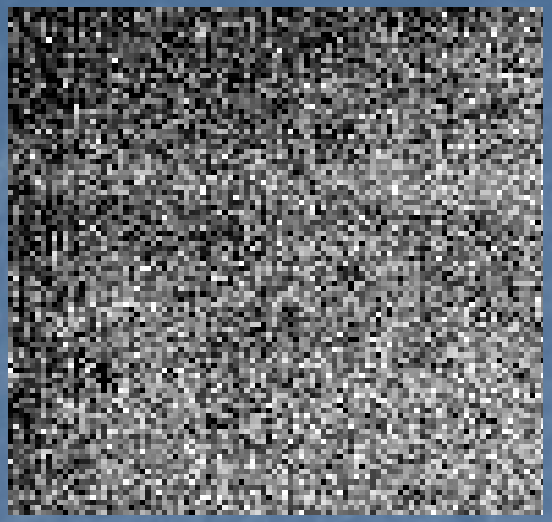
=



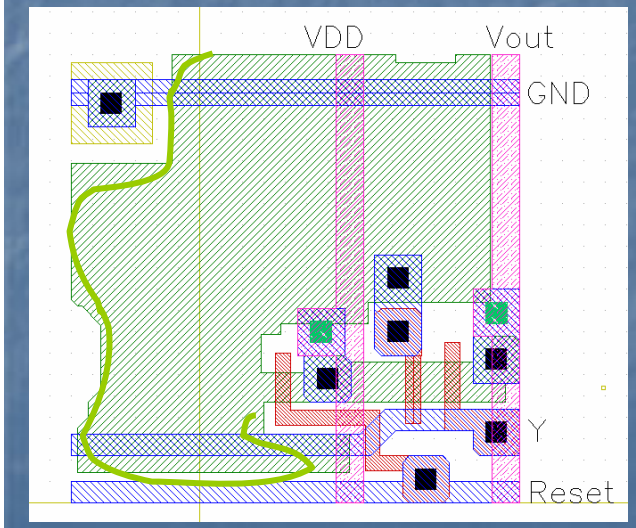
FPN total
Image
Brute
produite à la sortie
du
détecteur

- FPN colonne ⇨ contribution majoritaire :
  - 0.5 à 1% rms / dynamique
- FPN ligne et pixel < 0.2 %
- FPN peut être corrigé :
  - par logiciel (attention aux effets non linéaires)
  - par un circuit analogique sur la puce (lent)

Uniformité de réponse photonique : PRNU



Matrice	PRNU
Photodiode32x32	5%
PhotoMOS 32x32	10.5 %
PhotoMOS 128x128	0.7 % *
PhotoMOS 256x256	1% *



- Imprécision de la lithographie :
  - variation et irrégularité de la taille des éléments constitutifs d'un à un autre pixel (transistors…)
  - des transistors in-pixels :
    - ⇨ gain, offsets et facteur de conversion
- Lithographie Cmos 0.7µm meilleure PRNU / Cmos1.2µm

Consommation

- Matrice 32x32 : 6.8 mW @250 Kpx/s
- Matrice 128x128 : 2 mW @50 Kpx/s
  : 35 mW @20 Mpx/s attendu
- Matrice 256x256 : 75 mW @2 Mpx/s

Vitesse de lecture

- Images à 10Mpx/s (256x256 PhotoMos)

  ⇨ pas de dégradations cosmétiques (CTE)

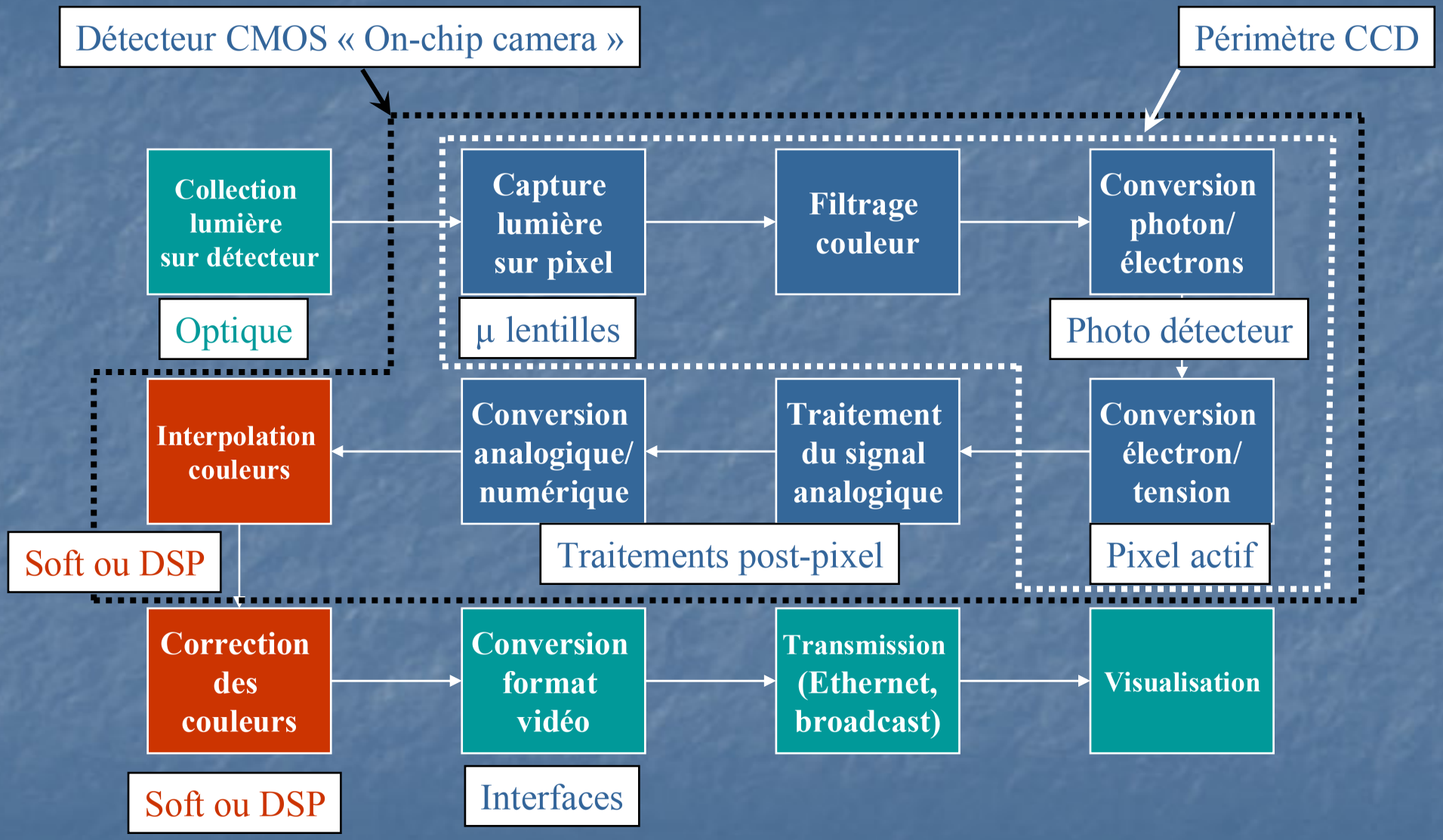
- Plusieurs megapixels : (record) 4800 image/sec détecteur 1000x1000 pixels

Comparaison de performances entre le CCD et APS

	APS	CCD
Dynamique	12 bits	15-16 bits
Bruit (50kpx/s)	15 e^- rms	5-10 e^- rms
QE (630 nm)	20%	40%
Courant d'obscurité	1000-150 pA/cm²	10-30 pA/cm²
Uniformité de réponse photonique	1%	1%
Consommation	Qq mW	Centaines de mW

- APS a des perfs. comparables aux CCD interligne, mais pas encore avec les CCD scientifiques

Rôle croissant du détecteur dans la caméra



Acteurs de l'APS CMOS

Société/Labo	Pays	Marché
Micron (ex Photobit)	USA	Grand public
Fill Factory	Belgique	Grand public – Photo numérique
Kodak	USA	Grand public
ST Microelectronics	UK	Grand public
Silicon Video	USA	Grand public HDTV
National SemiCond.	USA	Grand public
CANON	Japon	Photographie numérique
CIMI/SUPAERO	France	Spatial & Scientifique
CSEM	Suisse	Spatial & Scientifique

Etat du Marché capteur d ’image CMOS

- Large choix de détecteur de petit format standard
- Produits 2 MPixels prise de vue « snapshot » pour imagerie rapide
- Barrettes pour scanners
- Candidats aux rétrofits numériques d’appareils de photo argentiques (format 24x36 ou plus)
- Développement de produits Custom

Sept 2003 – CMOS 6 MegaPixels

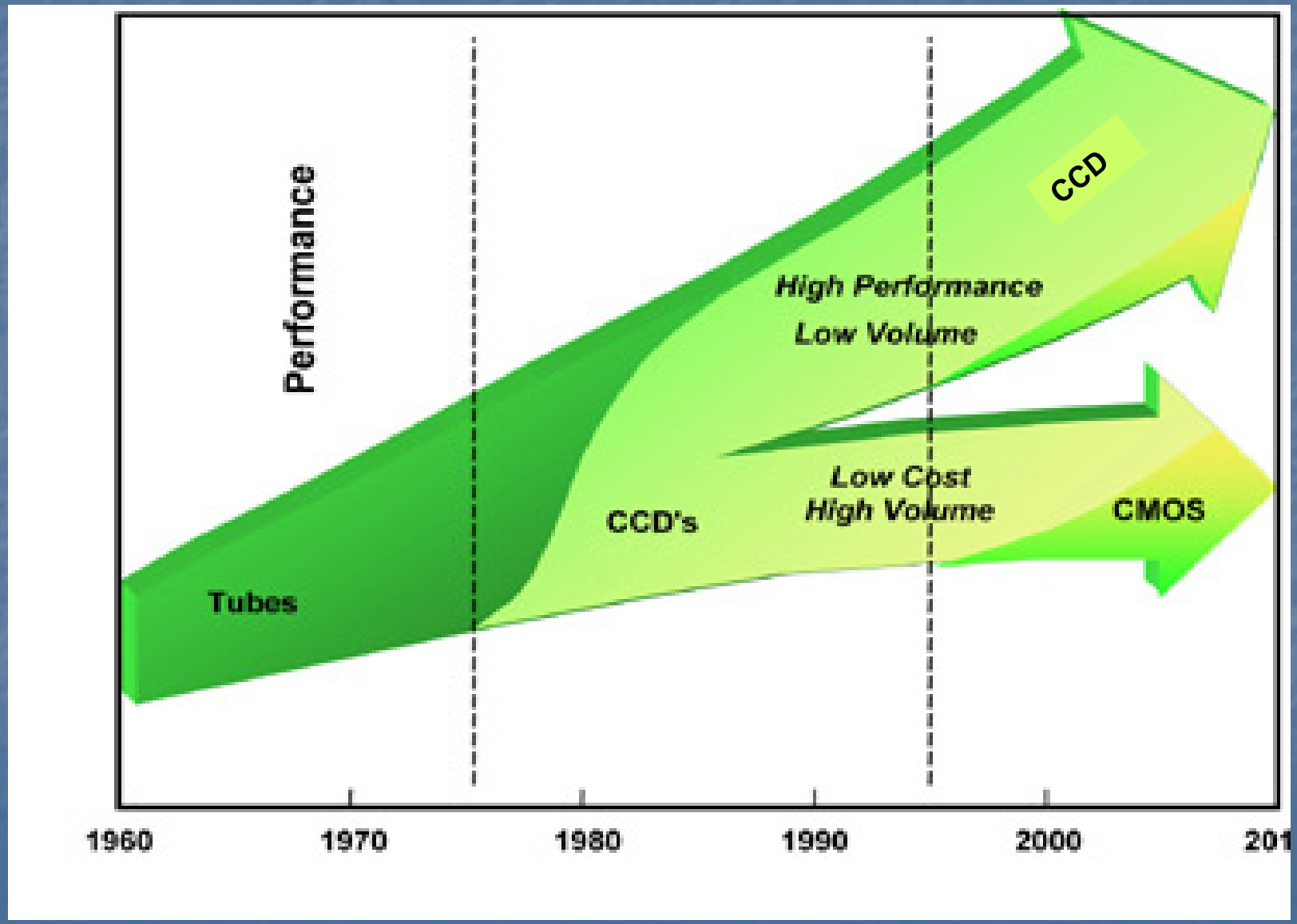
24x36mm , 11Mpix Kodak DCS Pro 14n digital

	CCD	CMOS
Technologie	Dédiée Mono source	Standard Multi source
Accès pixel	Série	Aléatoire
Fonctions « on-chip »	Non	Oui
Cout	Défavorable	Favorable
Rendements de fabrication	Moyen	Elevé
Mise en oeuvre	Délicate tensions exotiques	Facile (TTL)
Vitesse de lecture	Limitée	Elevée
Consommation	Défavorable	Favorable
Bruit de lecture	Qq électrons	10 e-
Rendement quantique	Très favorable	Défavorable
Lecture non destructive	Non	Oui

	CCD	CMOS
Grandes matrices	1600 mm²	400 mm² Un vrai pb, limitation du réticule (masque)
Taille du pixel	5 µm	5 µm
Nombre de pixels	20 millions	11 millions
Full well	200 Ke-	80 Ke-
Dynamique	Favorable (si lecture lente) 16 bits	Défavorable 13-14 bits
Fill Factor	100 à 50%	Rarement au delà de 75%
Bruit fixe	Zéro, non affecté	< 5% de la dynamique totale
Tenue aux radiations Spatial / nucléaire	Mauvaise	Bonne
Age et Esperance de vie	Depuis 1970, en baisse sur certains applis que le CMOS peut prendre	Depuis 1994, en pleine évolution…
Application clef	Scientifique, très faible flux	Grand public, appareils numérique

Marché imageurs **RoadMap KODAK**

Tendance : migration technique des détecteurs



CCD/CMOS/œil/film - synthèse des performances

Critère	Œil	Film	CCD	CMOS APS
Rendement Quantique Pic	< 10%	<3%	> 85%	~ 45%
Fenetre spectrale	0.4-0.7µm	0.4-0.7µm	0.3-1.1µm	0.3-1.1µm
Dynamique (Linéaire)	100	500	40000	7000
Dynamique (Log)	106	1024	N'existe pas	100 dB
Nbre d'éléments	120 millions	22 millions sur 24x36 mm	20 millions	11 millions
Taille pixel	2.3 x 2.5 µm	10-20µm	9µm	8µm
Traitement « on chip »	Très développé	non	Non	Filtres, conversion numérique
Cycle de developpement	520 millions d'années	10-20 ans	3 ans	1 an

Merci de votre attention