

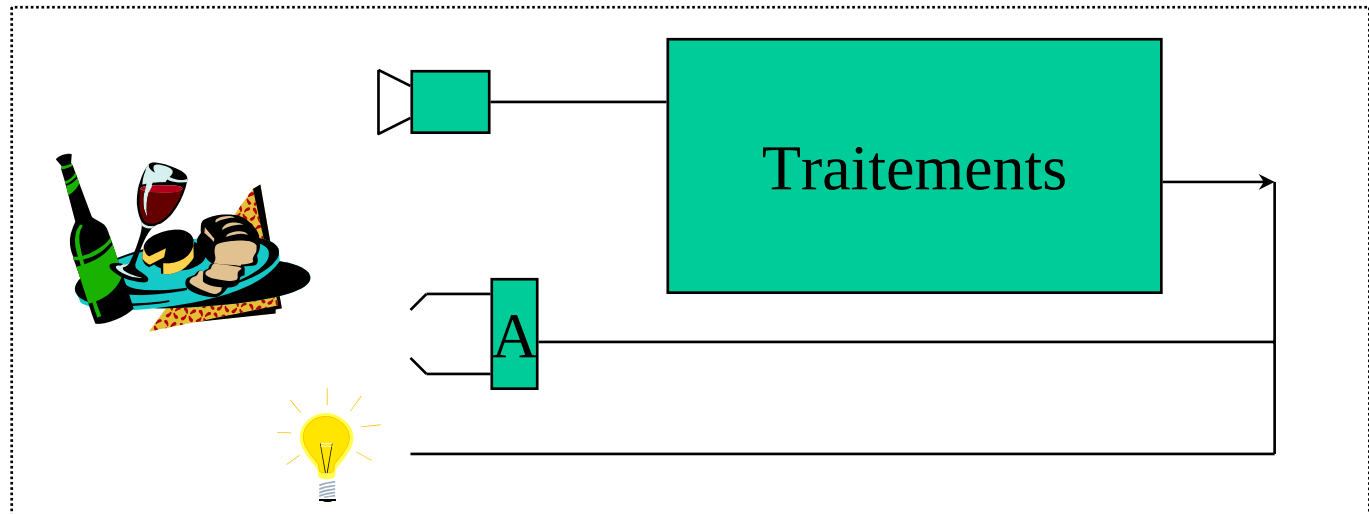
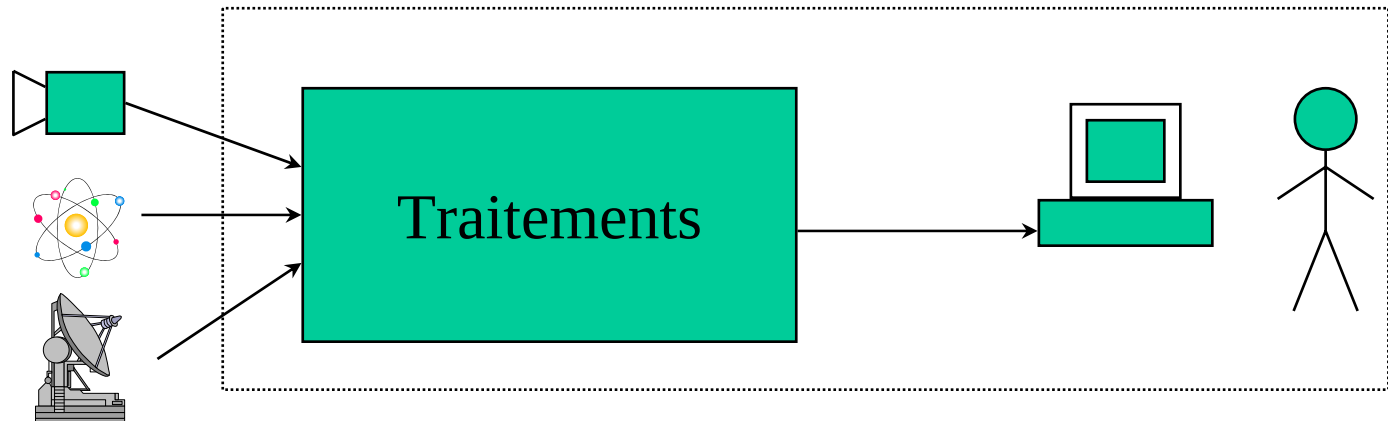
Système de vision à base de rétine E

Adéquation Algorithme-Architecture-Application
pour la machine de vision artificielle

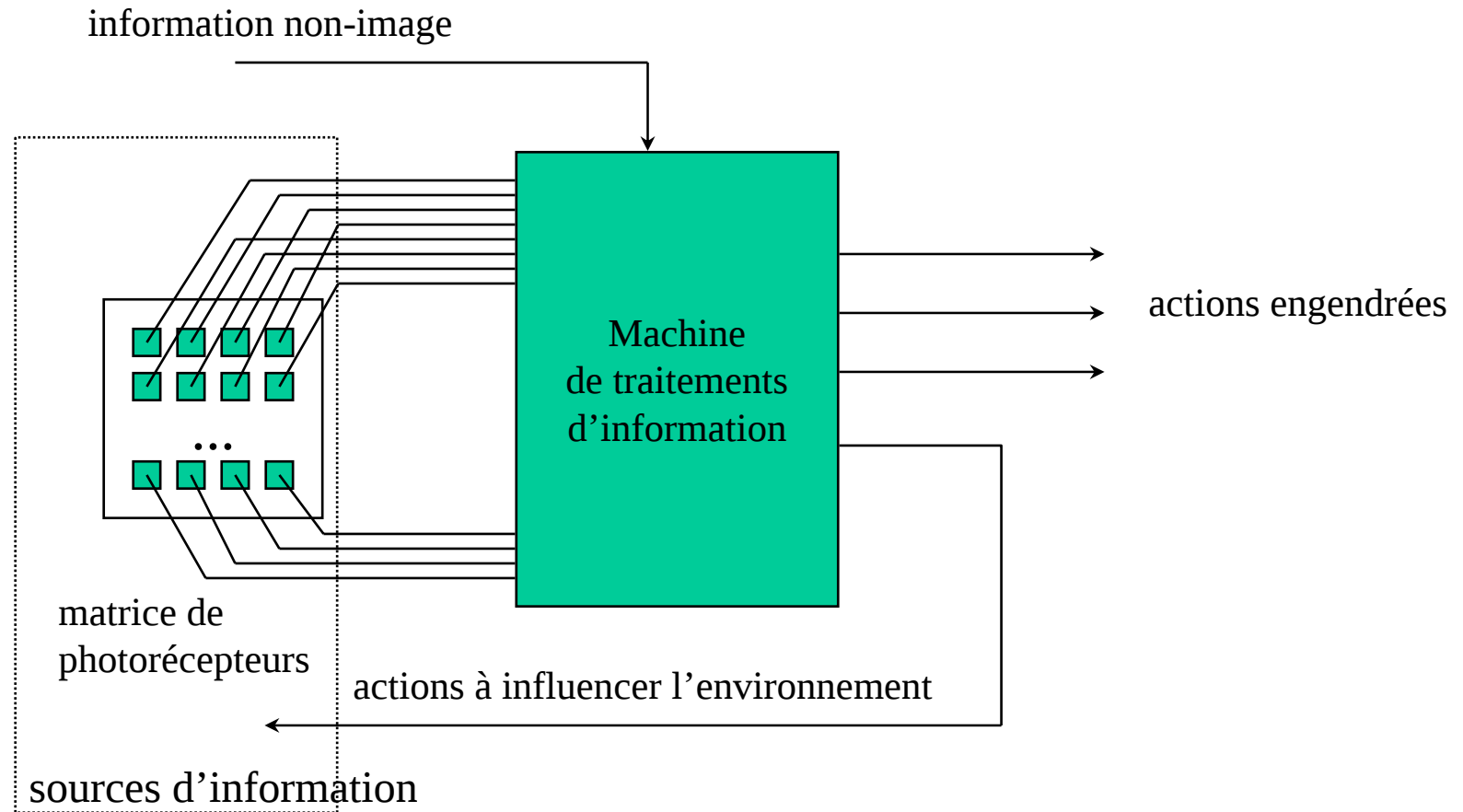
Professeur Yang NI

Département Electronique et Physique
Institut National des Télécommunications
Email: yang.ni@int-evry.fr

Traitement d'image & Vision artificielle



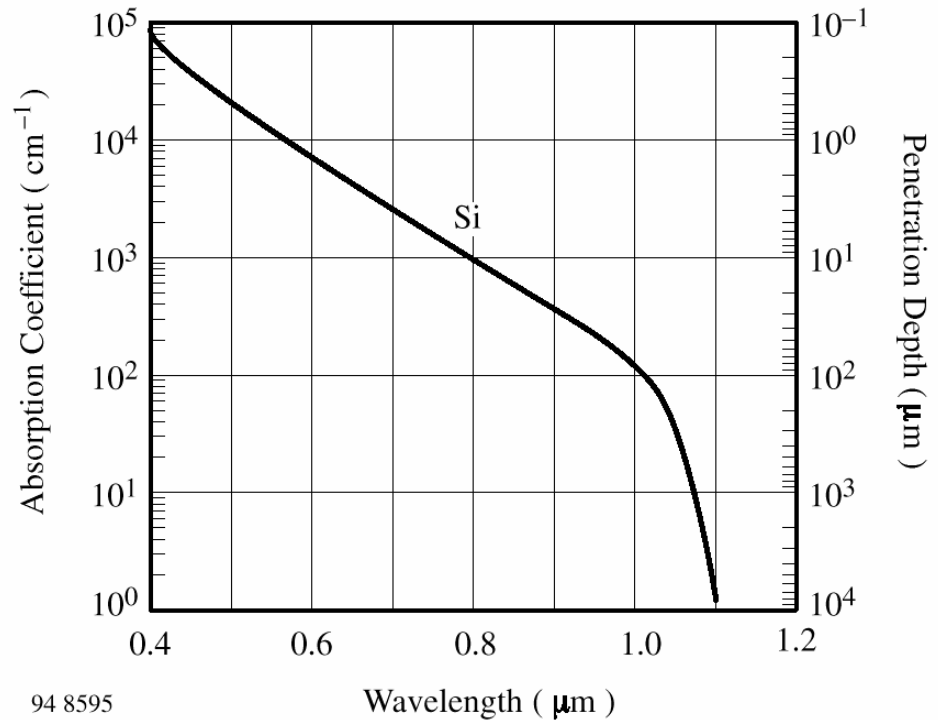
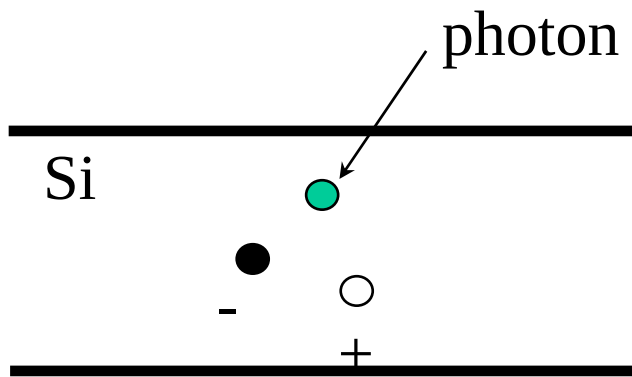
Architecture générique/idéale d'une machine de vision



Information issue des photorécepteurs

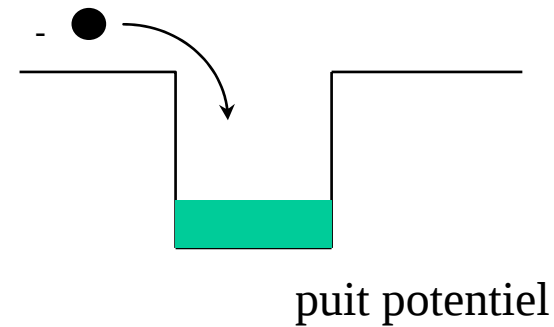
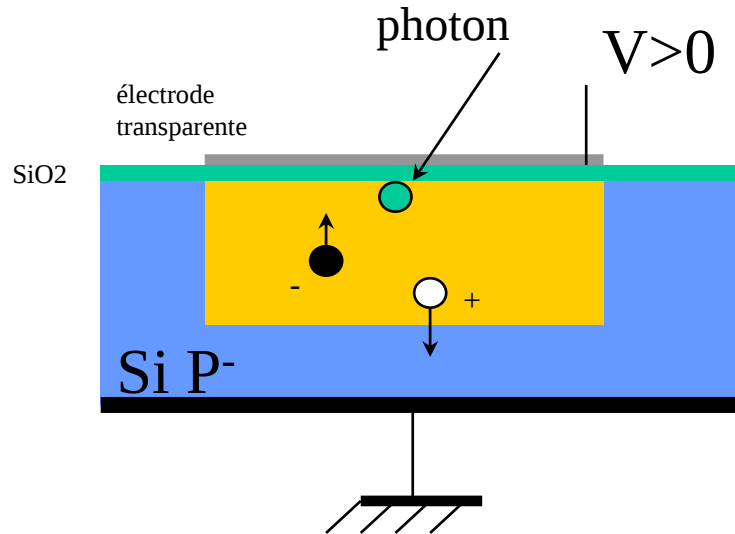
- Information temporelle
 - variation locale de la luminosité
 - valeur absolue instantée de la luminosité
- Information spatiale
 - distribution spatiale de la luminosité
- Information spatio-temporelle
 - corrélation entre les variations de la luminosité
 - corrélation entre l'influence artificielle et les réponses des photorécepteurs

Photorécepteurs Si



- * génération des électrons libres par des photons
- * collection de ces électrons libres

Photodétecteur Si en capacité MOS



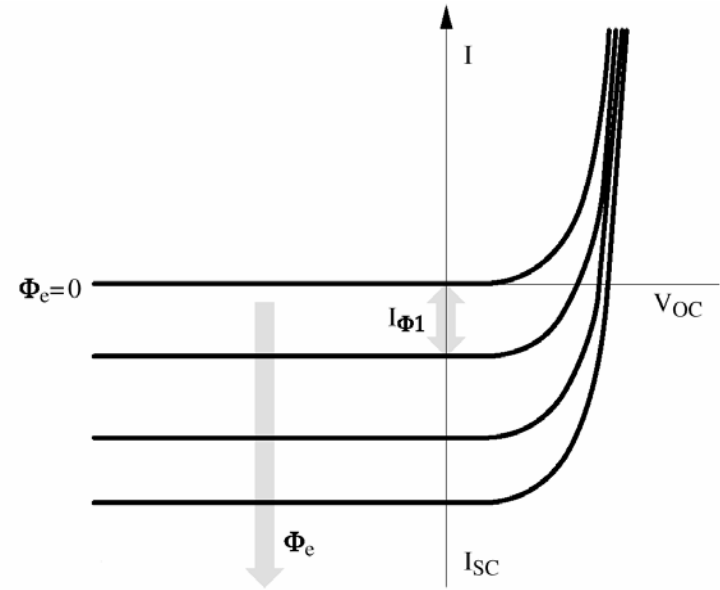
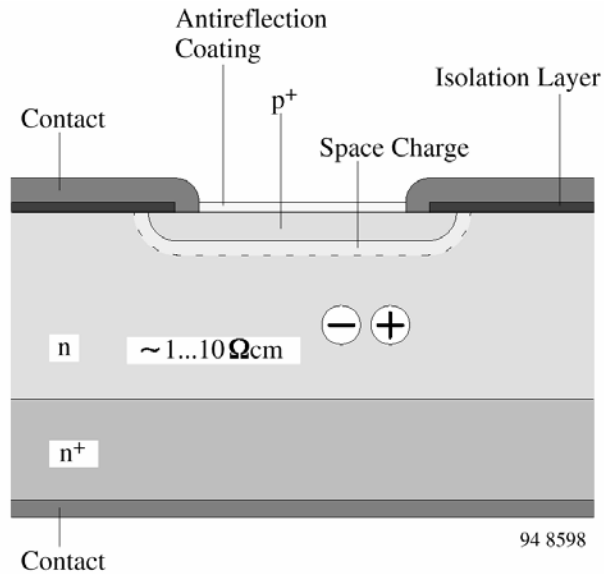
$$Q = q \int_0^{T \text{ exp}} \eta(\lambda) P(\lambda, t) dt$$

λ longueur d'onde de photons incidents

$\eta(\lambda)$ rendement quantique

$P(\lambda, t)$ flux de photons incidents

Photodétecteur Si en jonction PN



Mode photodiode
(polarisée en inverse)

$$Id = -s(\lambda)P(\lambda, t)$$

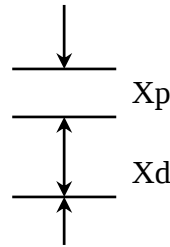
Mode photopile
(circuit ouvert)

$$Vd = V_T \ln \left[\frac{s(\lambda)P(\lambda, t)}{Is} + 1 \right] \quad V_T = \frac{kT}{q}$$

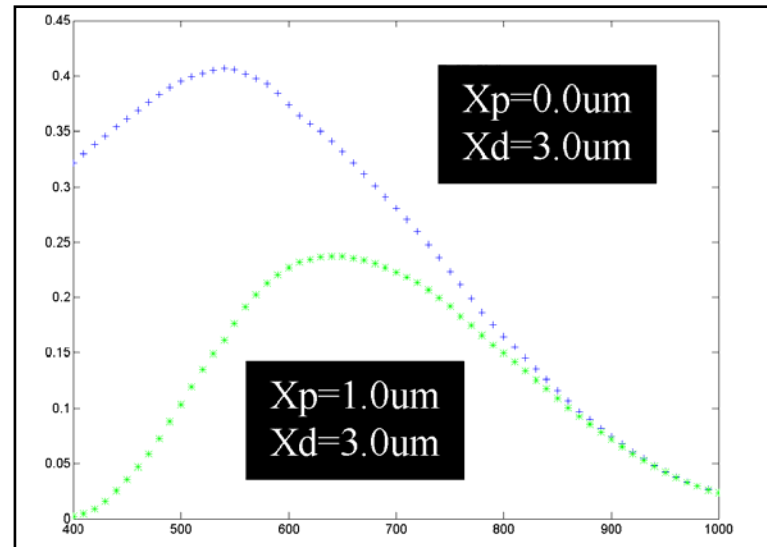
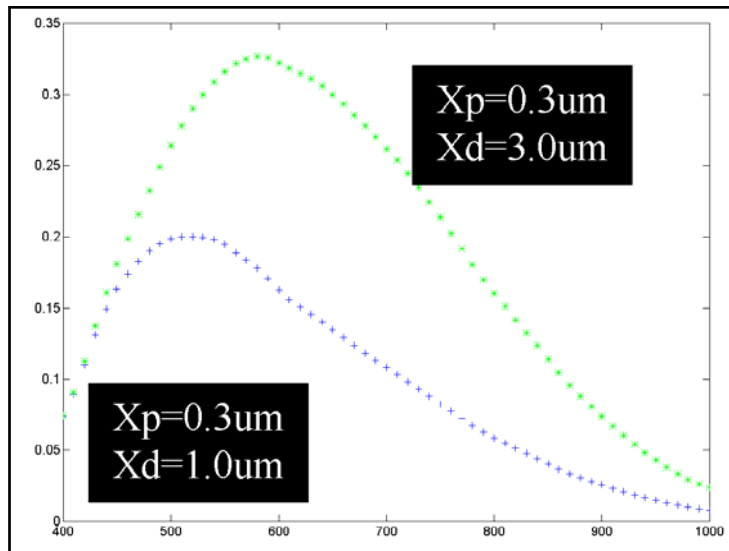
Réponse spectrale d'un photodétecteur

zone de collection

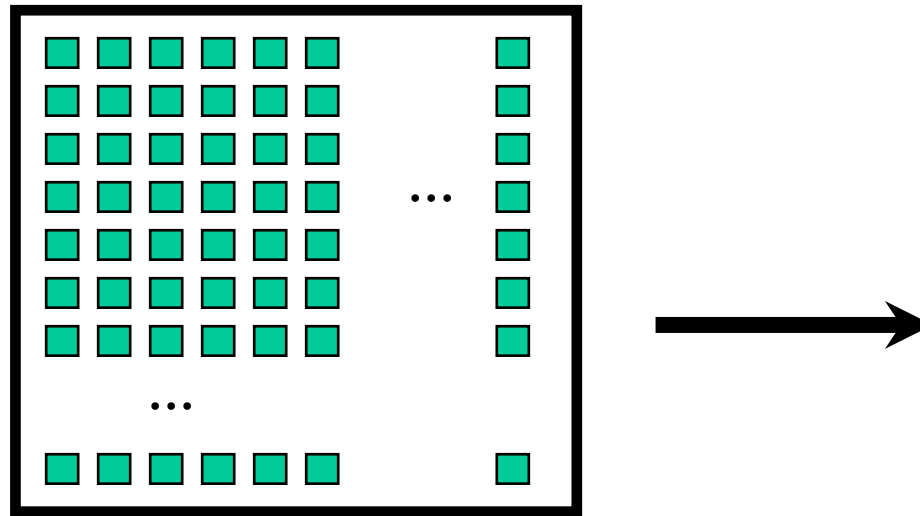
Si



La réponse spectrale dépend principalement de la profondeur X_p et l'épaisseur X_d de la zone de collection

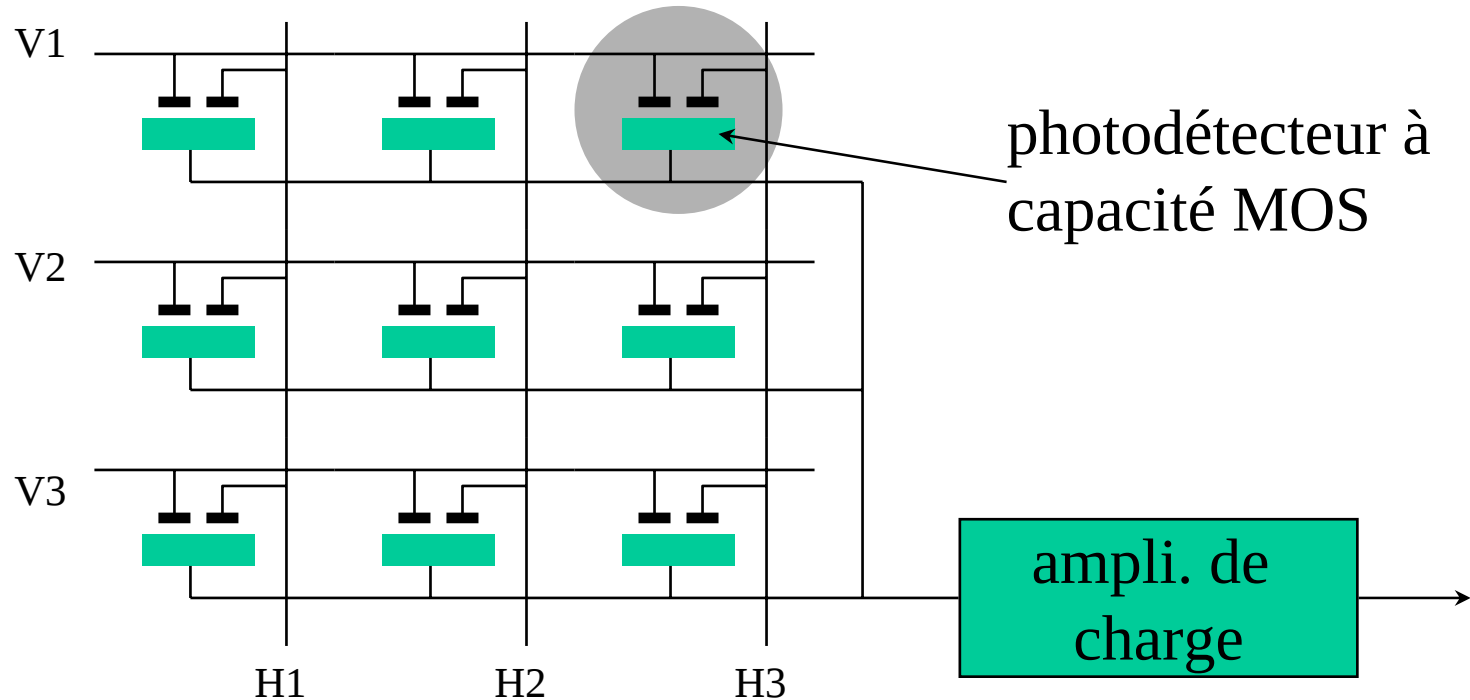


Capteur d'image à partir des photodétecteurs



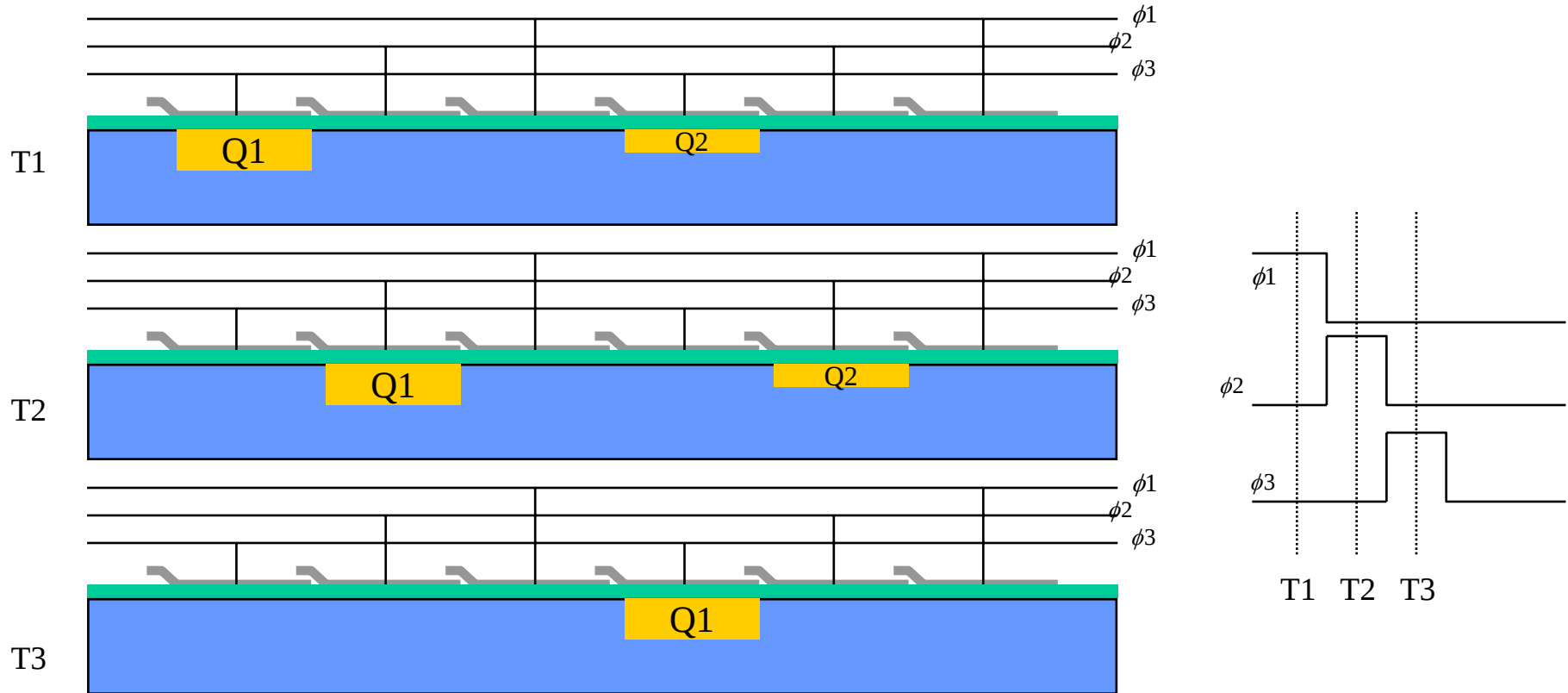
Comment lire les photodétecteurs dans une matrice ?

Capteur CID

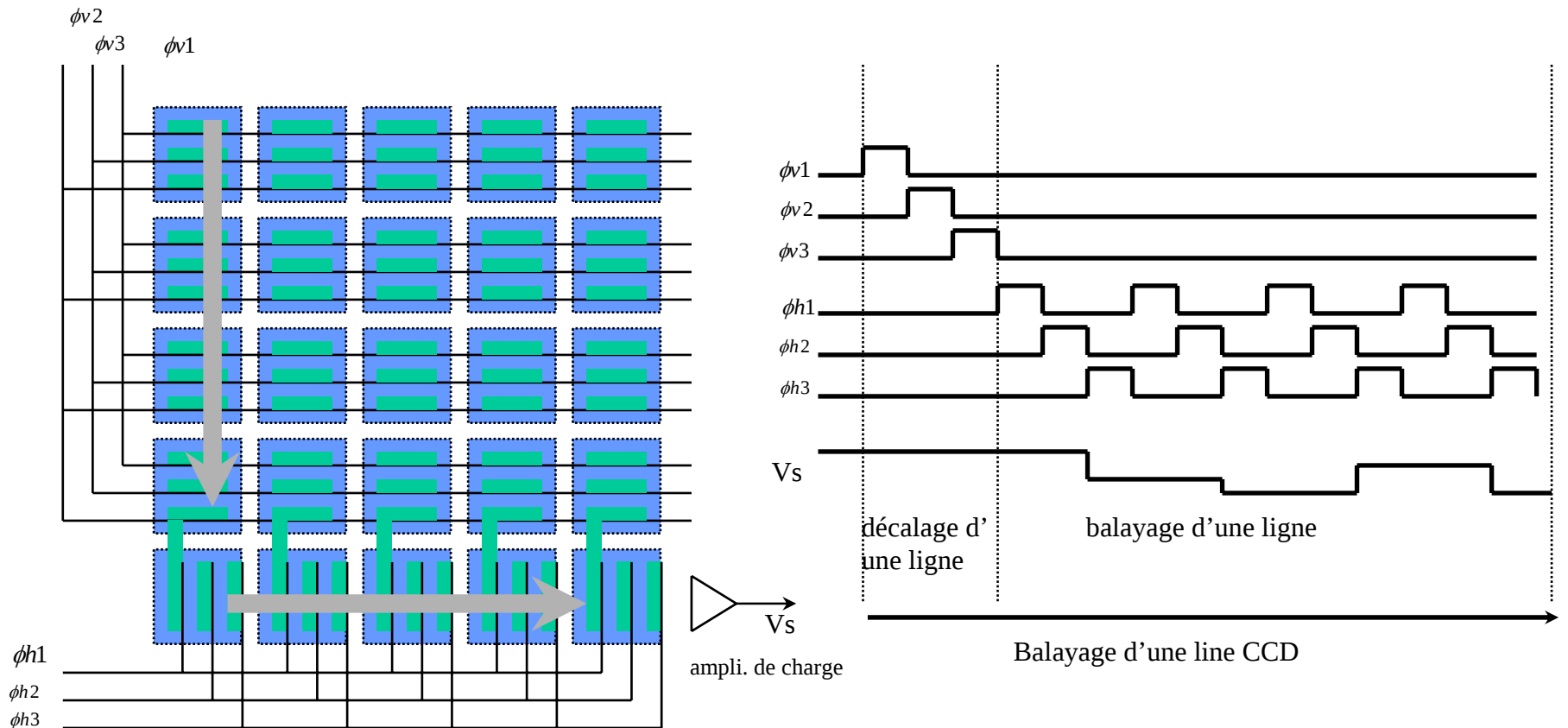


- $V_x=H_x=0$ injecte la photocharge dans le bus de lecture
- accès aléatoire
- Bruit KTC très important !

Capteur d'image CCD (1)

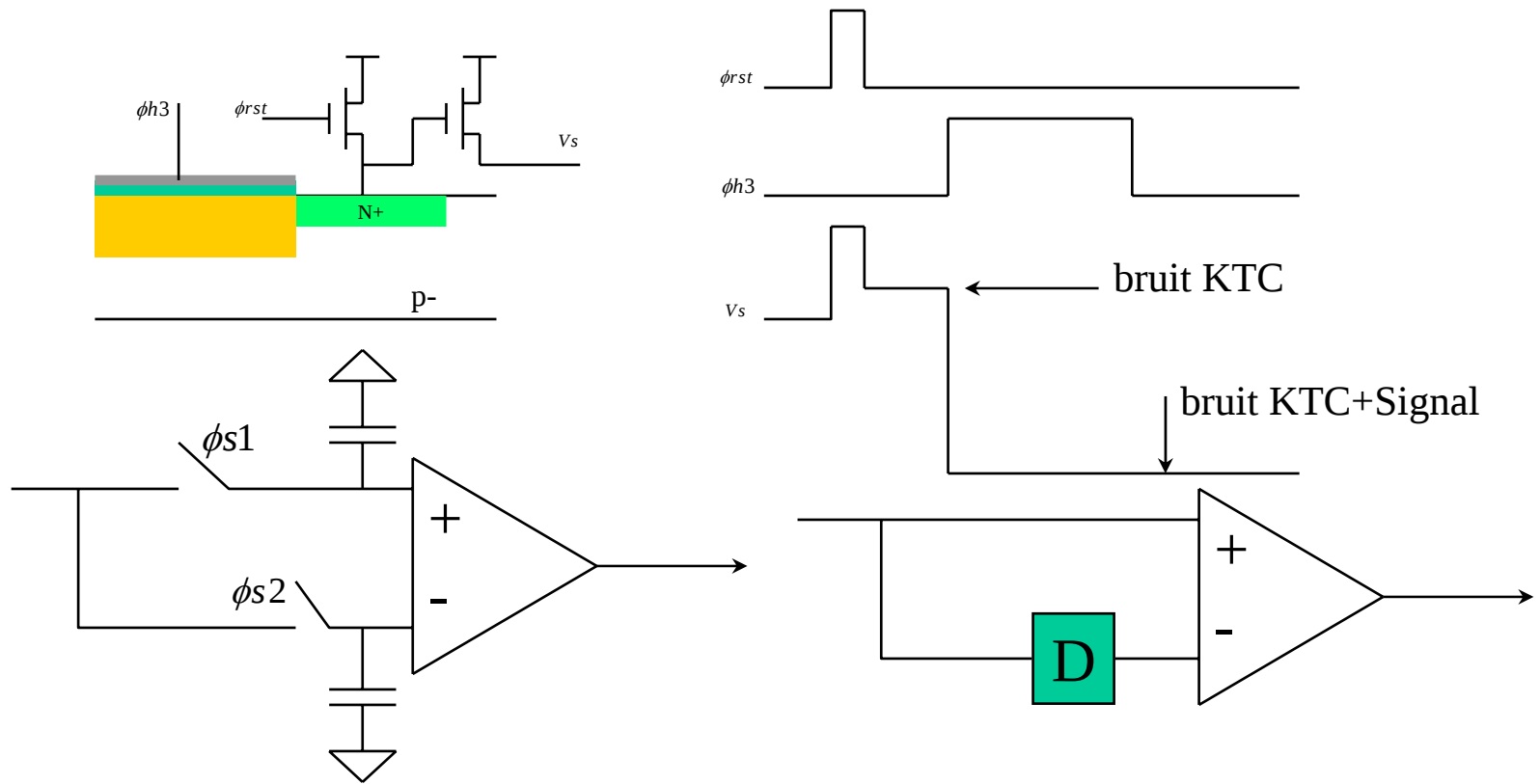


Capteur d'image CCD (2)



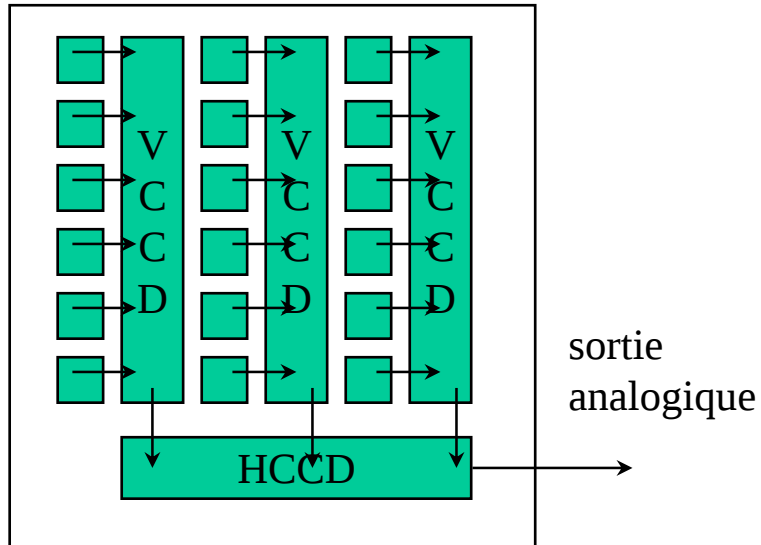
Une lecture séquentielle ligne par ligne avec le mécanisme CCD. Les éléments CCD jouent un double rôle: photocapteur et registre à décalage analogique.

Capteur d'image CCD (3)

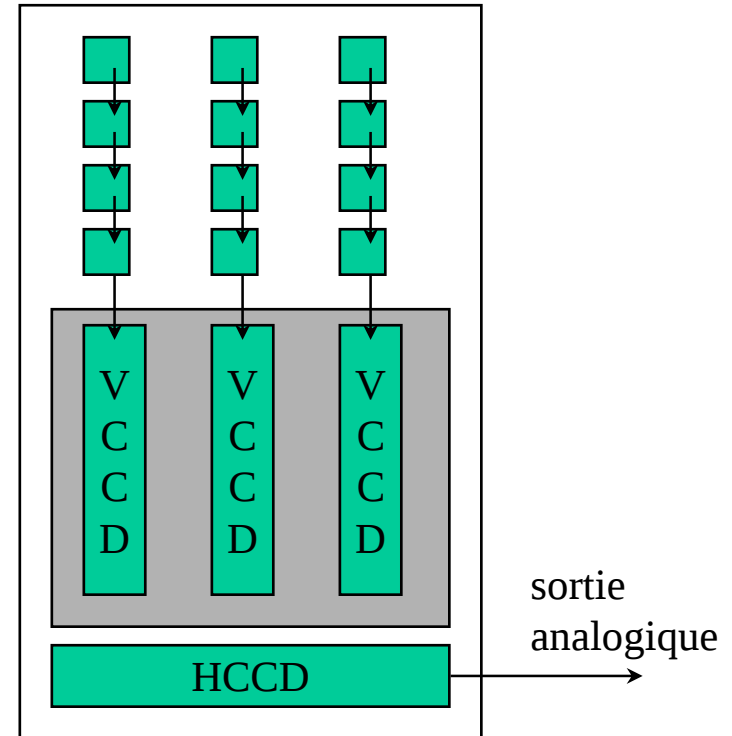


- Ces circuits sont appelés CDS (Correlated Double Sampling)
- Niveau de bruit possible < 1 électron

Capteur d'image CCD (4)

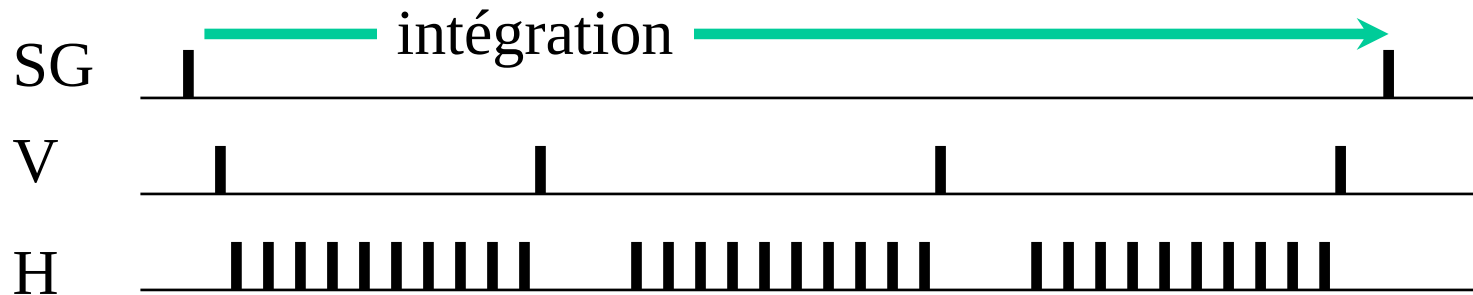


Caméra CCD à transfert de trame interligne

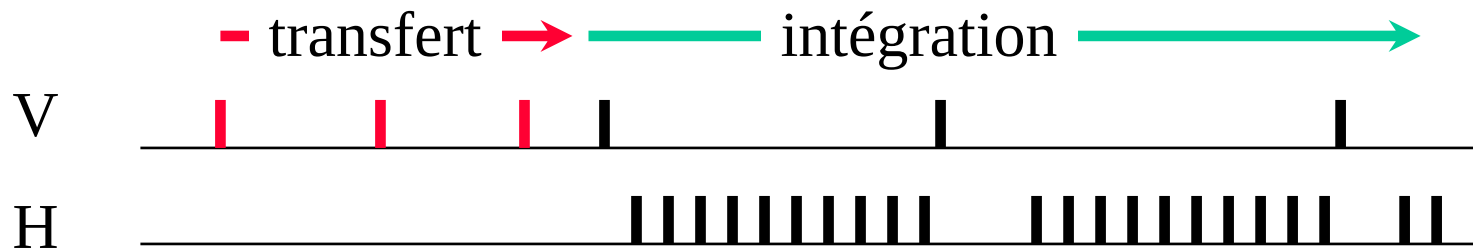


Caméra CCD à transfert de trame

Capteur d'image CCD (5)

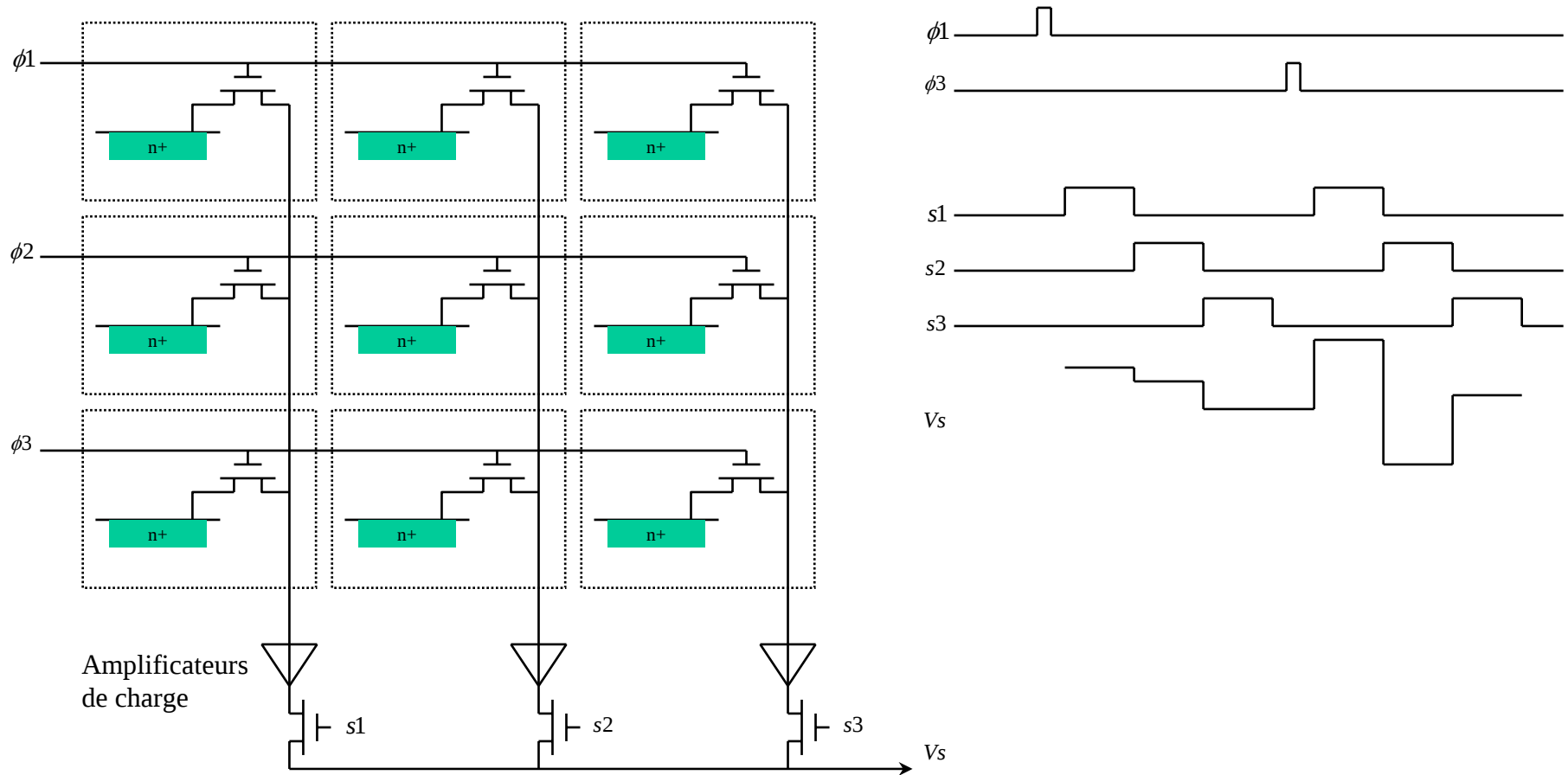


séquence de fonctionnement CCD IT

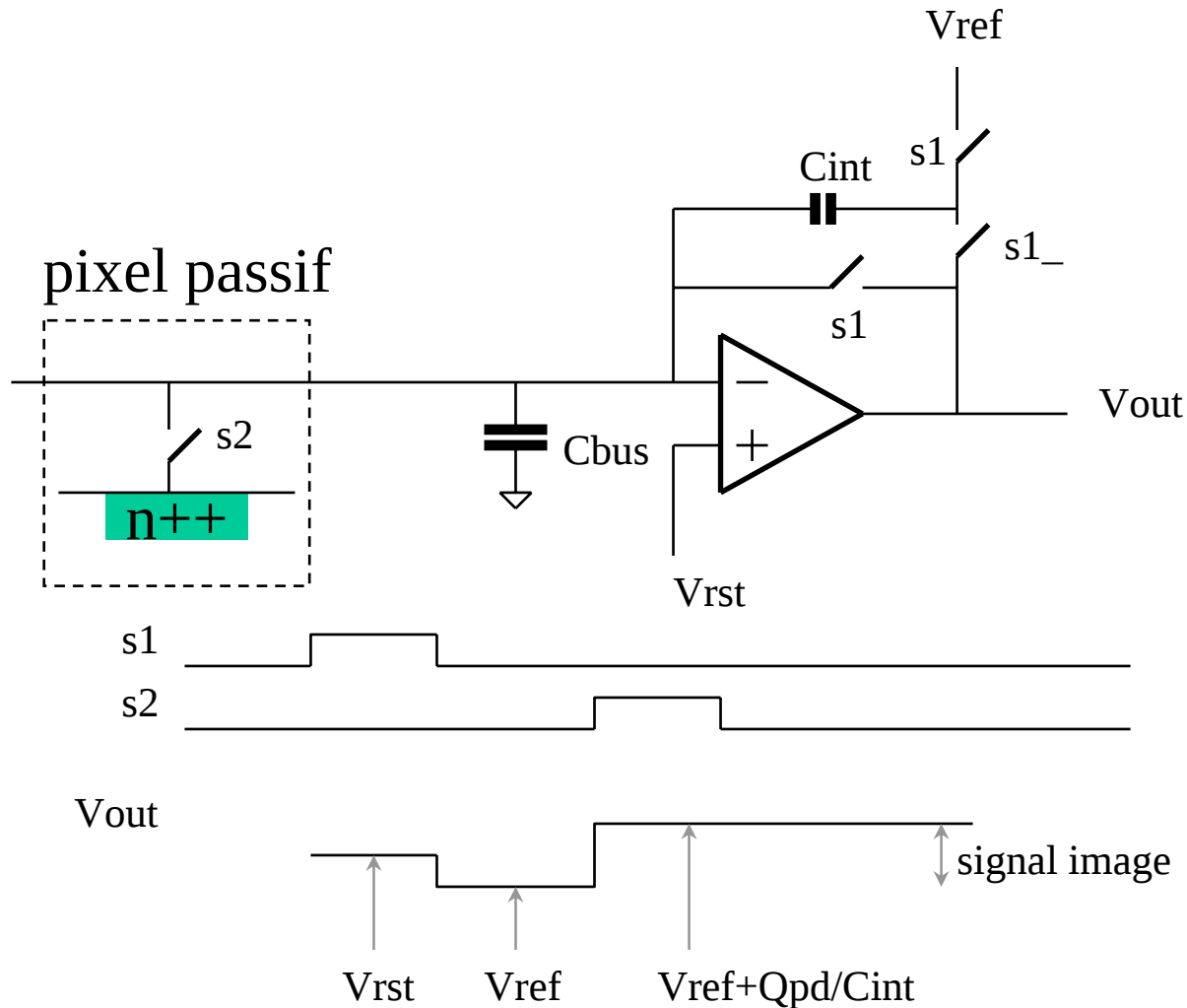


séquence de fonctionnement CCD FT

Capteur CMOS à pixel passif (1)

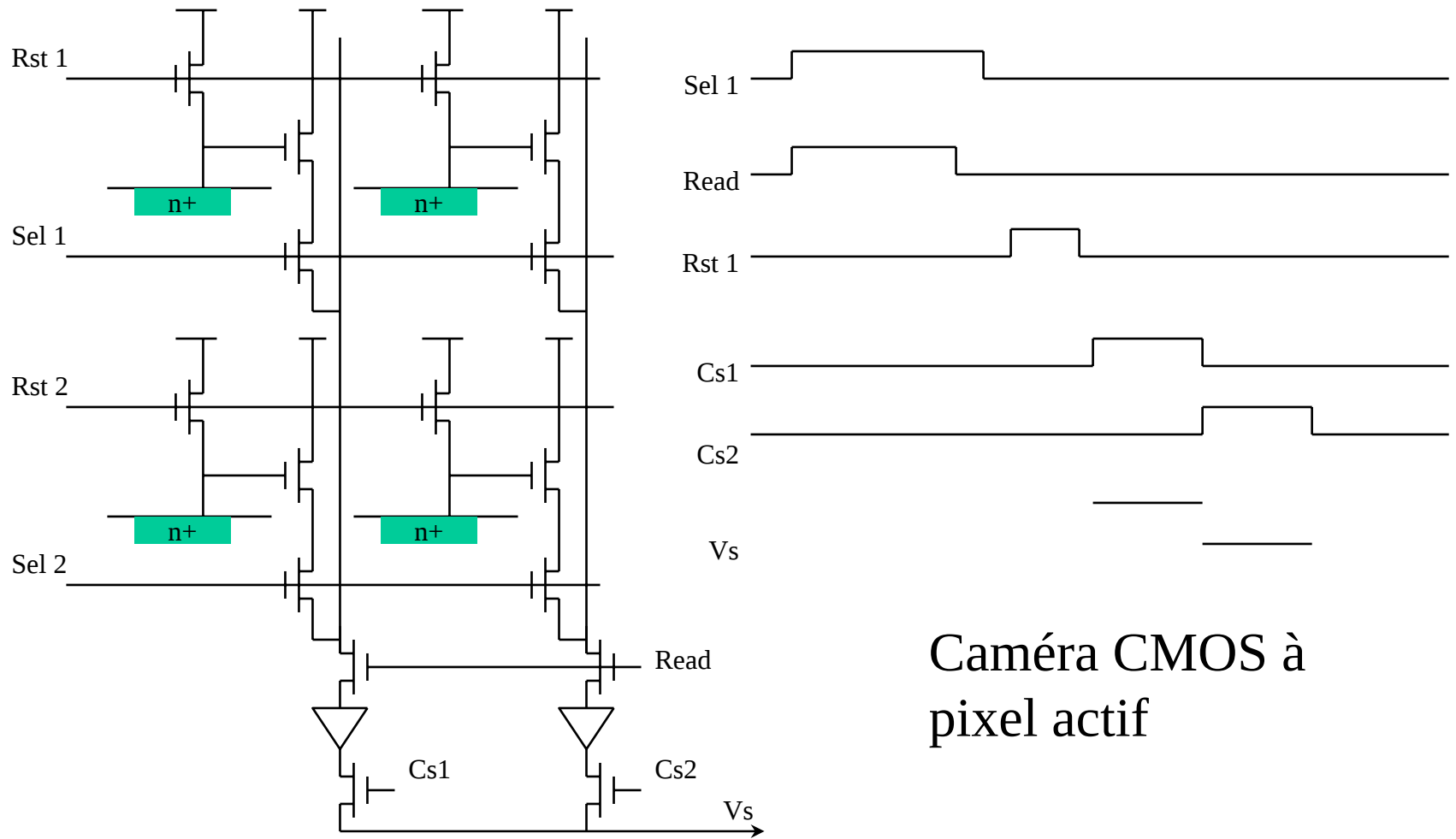


Capteur CMOS à pixel passif (2)



Est-il possible de réduire le bruit KTC ici ????

Capteur CMOS à pixel actif



Caméra CMOS à
pixel actif

Compensation du bruit spatial fixe (1)

- source = dispersion paramétrique de transistors

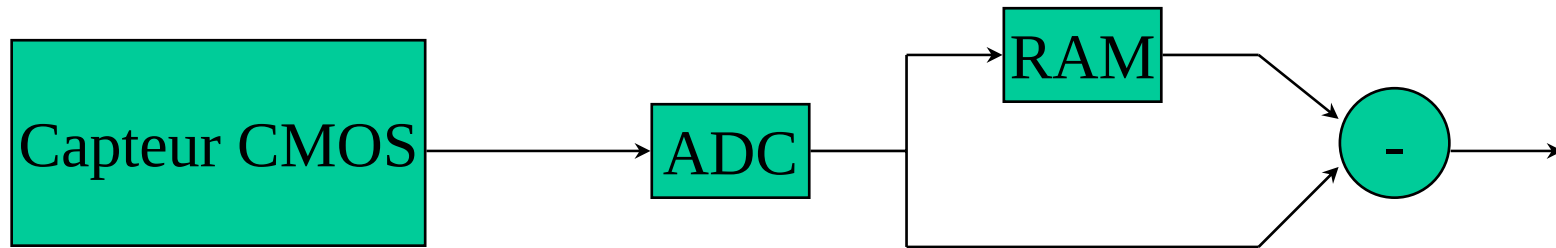


image contenant du bruit BSF

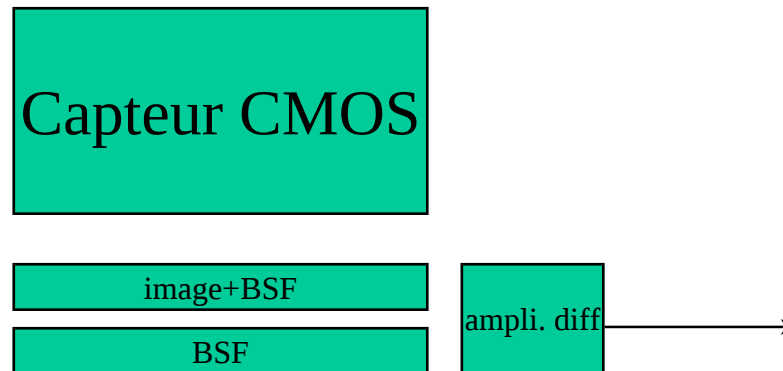


image après compensation

Compensation du bruit spatial fixe (2)

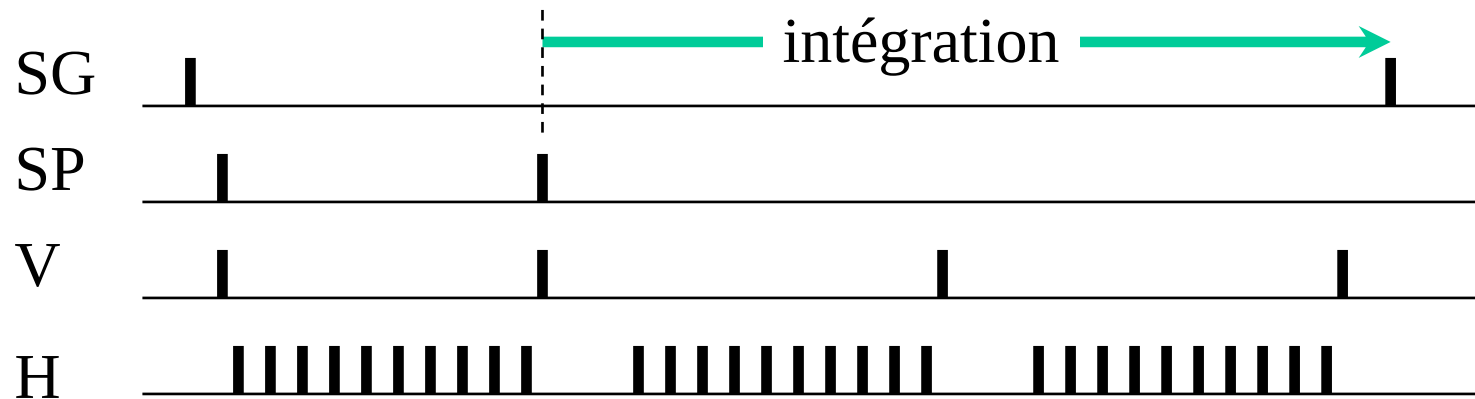


compensation numérique externe

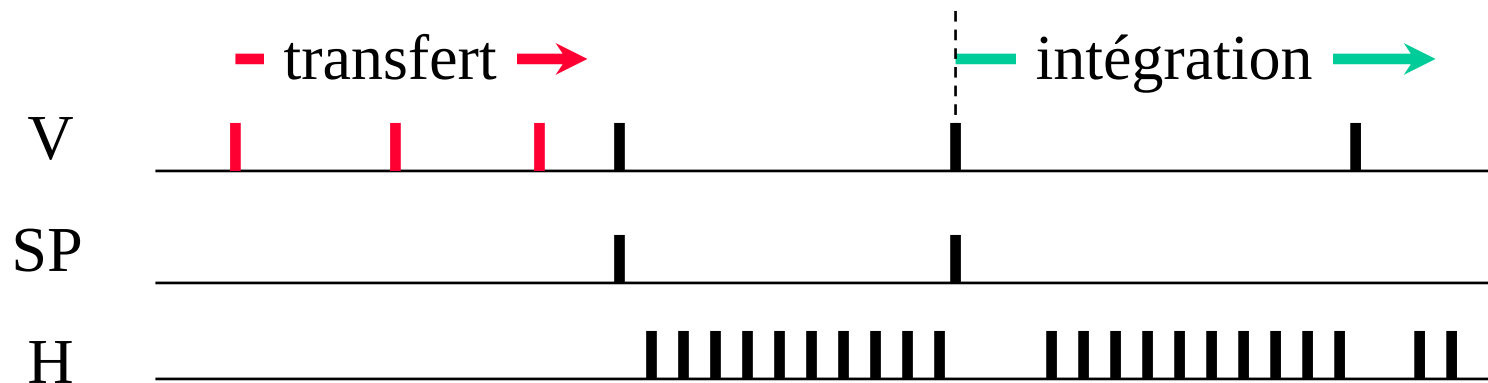


compensation analogique interne

Contrôle du temps d'exposition (CCD)



séquence de fonctionnement CCD IT



séquence de fonctionnement CCD FT

Contrôle du temps d'exposition (CMOS)



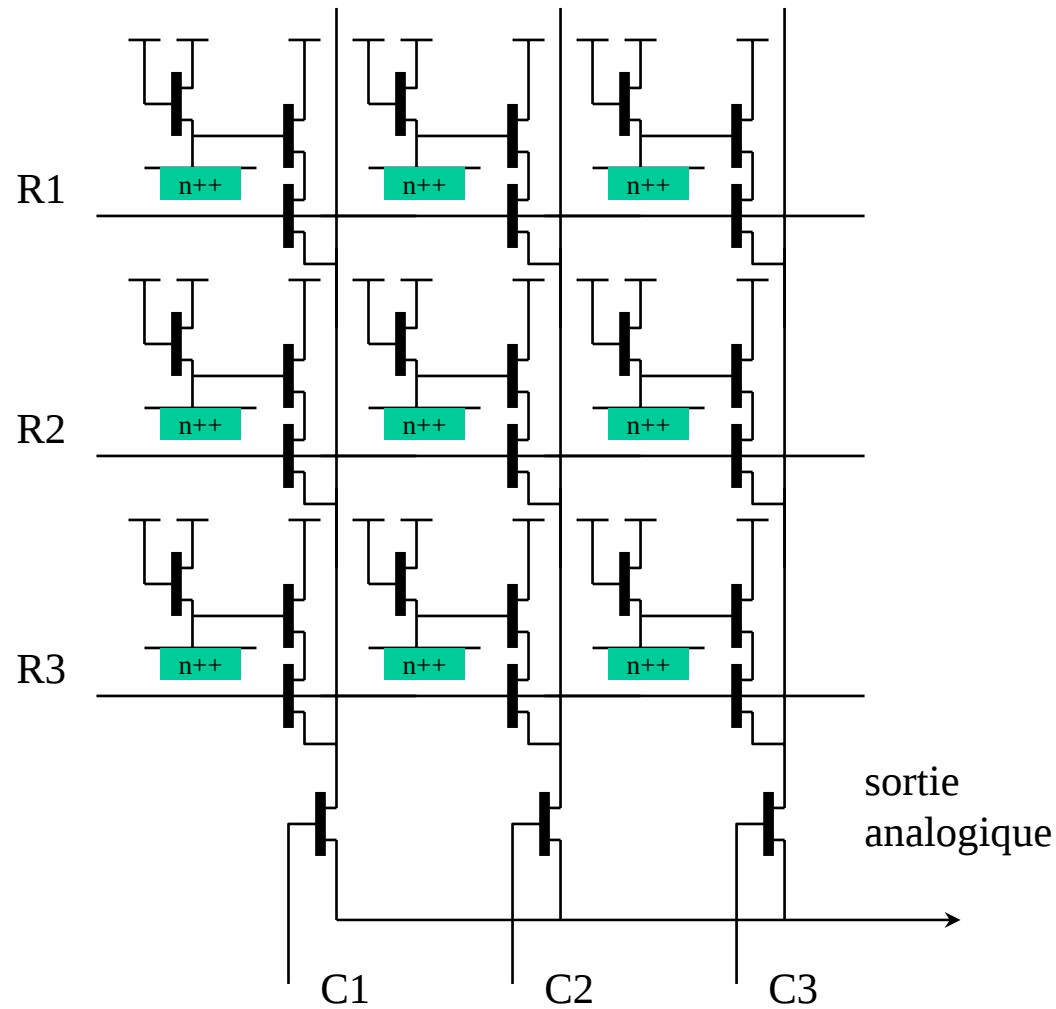
Temps d'exposition = Temps de lecture



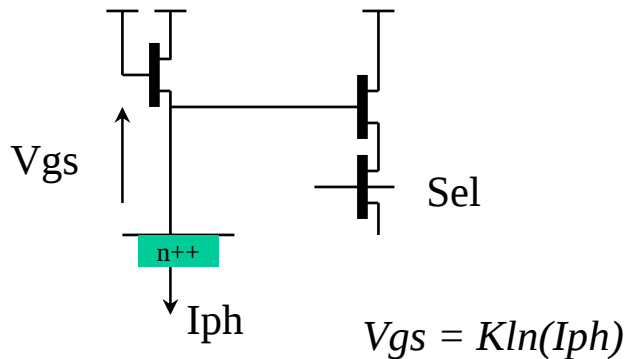
Temps d'exposition < Temps de lecture

lecture fictive

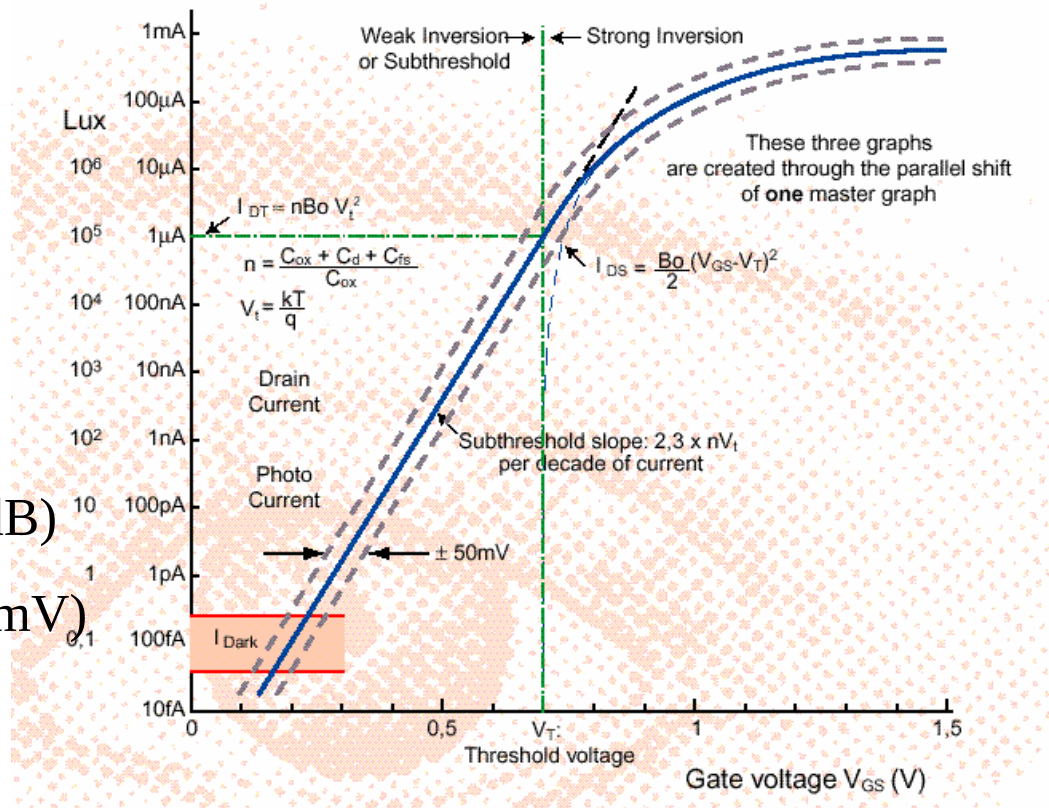
Capteur CMOS à réponse logarithmique(1)



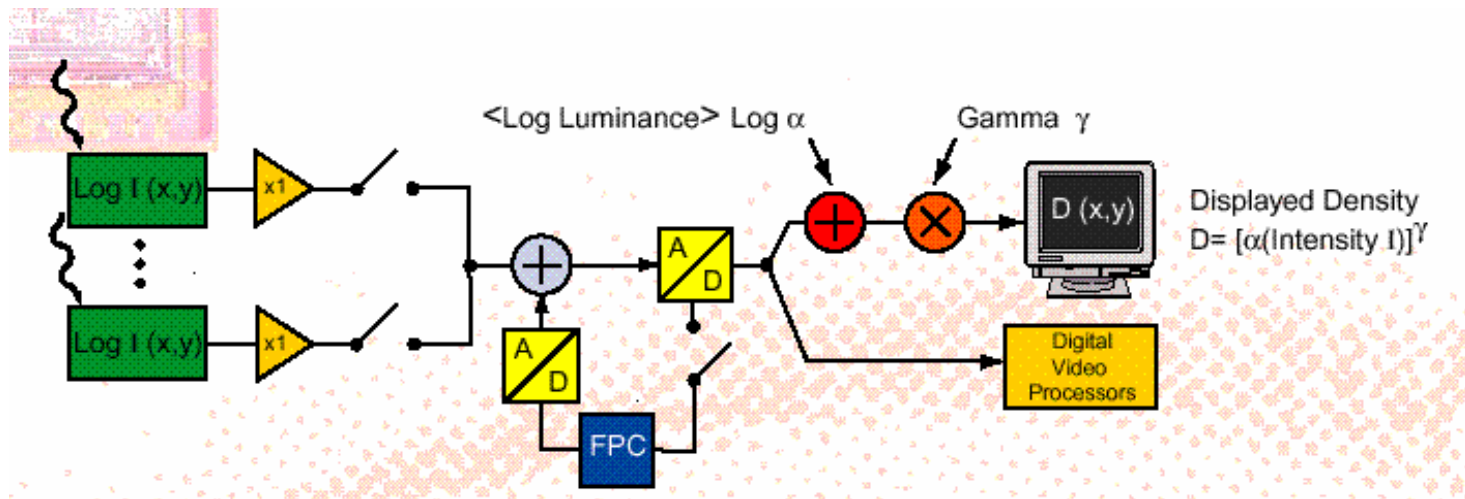
Capteur CMOS à réponse logarithmique(2)



- très grande dynamique (>120dB)
- faible amplitude du signal (20mV)
- très fort BSF (10x > signal !)

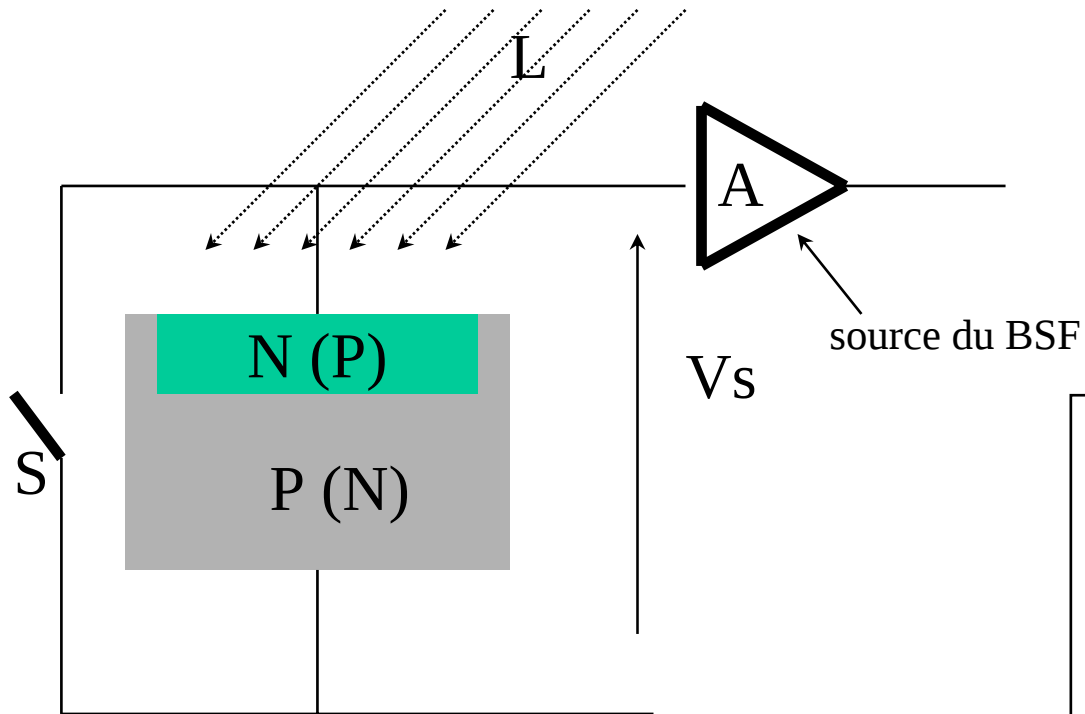


Capteur CMOS à réponse logarithmique(3)



Compensation du bruit spatial fixe (réalisation off-chip)

Capteur CMOS Log à auto-compensation (1)

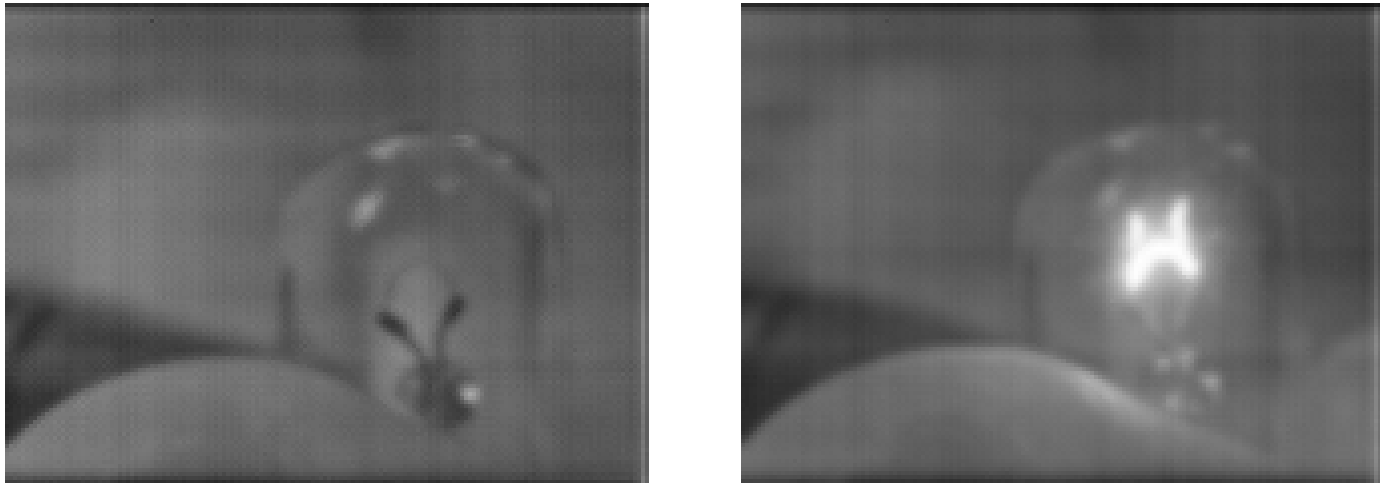


- La fermeture de S donne une référence noire !
- Suppression du BSF par double lecture du photoélément
- Réalisation monolithique possible

$$V_s = V_t \ln\left(\frac{I_s + I_{ph}}{I_s}\right)$$

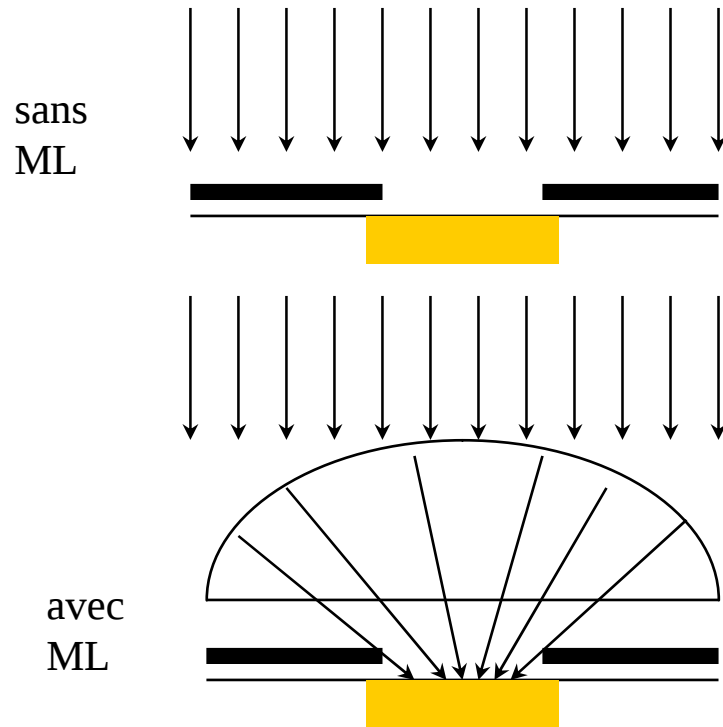
$$\begin{array}{l} I_{ph}=0 \\ S=1 \end{array} \Bigg| \longrightarrow V_s=0$$

Capteur CMOS Log à auto-compensation (2)

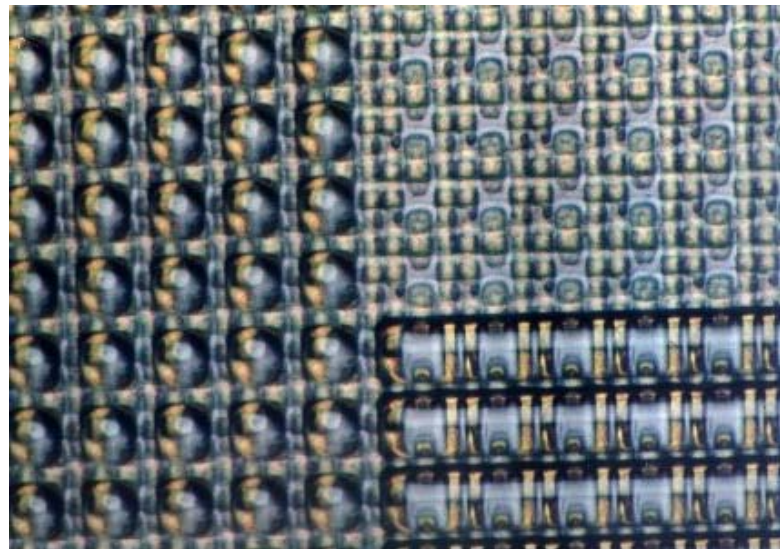
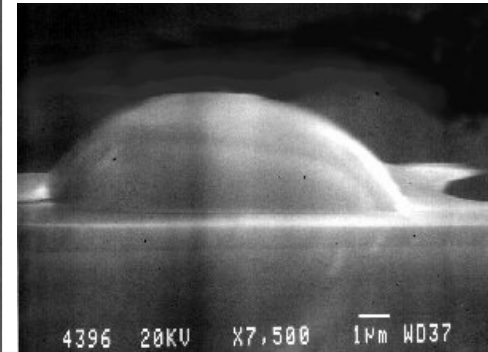
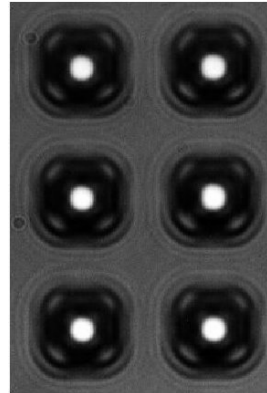


Images issues d'un circuit prototype à 160x120 pixels
avec une compensation BSF on-chip.
(Yang NI et Karine MATOU, 2000)

Amélioration de la sensibilité par ML



une amélioration $> 6\text{dB}$ est couramment possible sur des capteurs CCD et CMOS à pixel actif



Problèmes & conséquences - CCD

- Pertes d'information temporelle
 - traitements complexes
- Aliasing temporel + lecture séquentielle
 - Confusion spatio-temporelle
- Dissociation absolue entre la formation d'image et la lecture d'image
 - problèmes de contrôle du capteur
- déformation locale de micro lentilles
 - problèmes dans l'interpolation subpixel

Problèmes & conséquences - CMOS

- les mêmes pb. que ceux de CCD, mais +
- Bruit spatial fix
 - complexité des traitements de compensation
- Bruit KTC
 - problème de sensibilité & S/B
- Exposition ligne par ligne
 - distorsion des objets en mouvement
 - problèmes avec des lumières artificielles

Conclusion

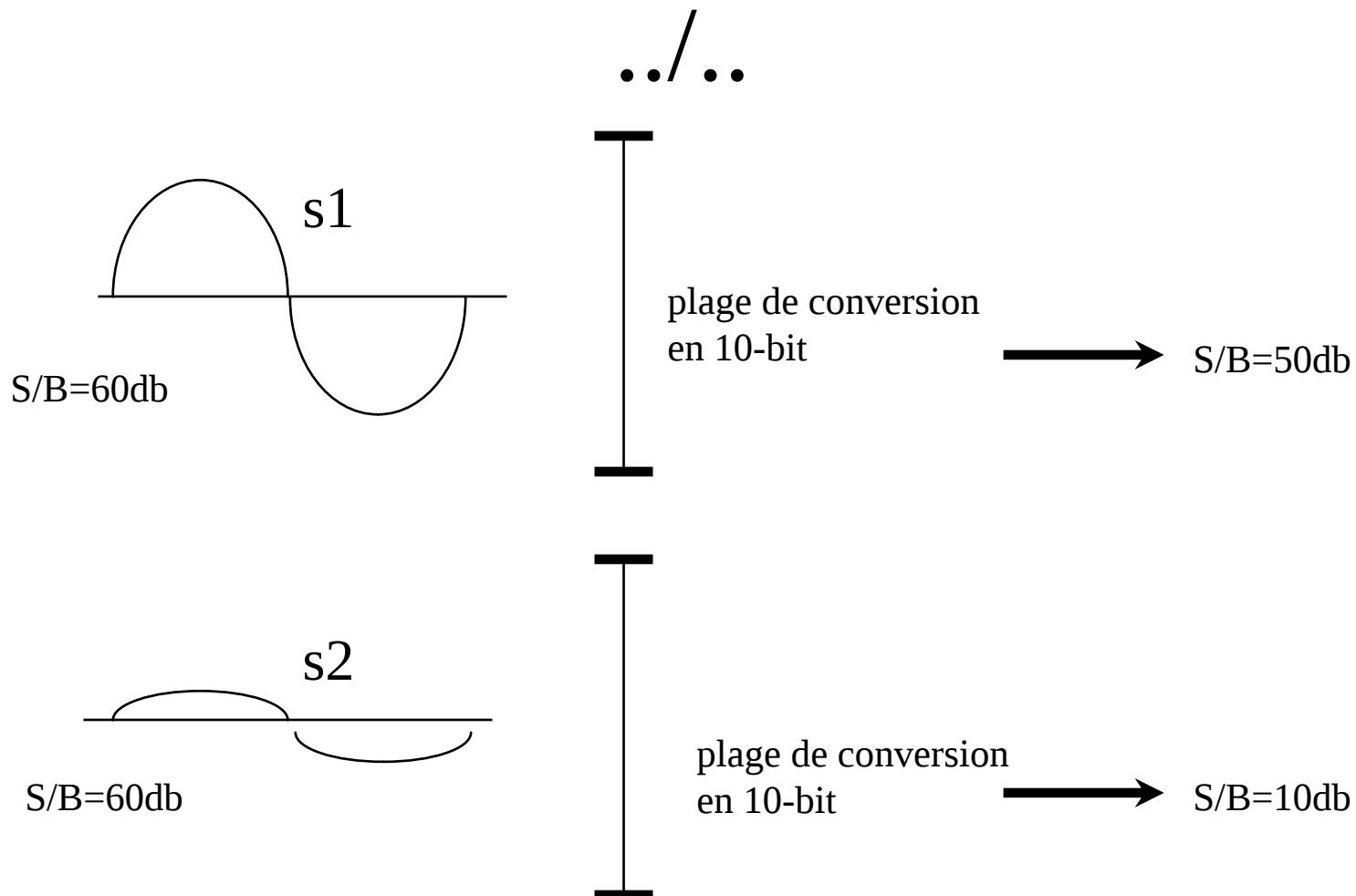
- Tous les capteurs ont des défauts intrinsèques
- Choix d'un capteur dépend de l'application visée
- Analyse fine des informations à préserver dans le capteur utilisé est primordiale

Traitements analogiques et digitaux

- Traitements analogiques
 - par lois physiques et électriques
 - réservés à des traitements de bas niveau
 - directement compatibles avec le signal des photorécepteurs
 - implantation in situ possible dans un pixel
 - précision faible (<10-bit)
 - parallélisme intrinsèque du style SIMD
- Traitements digitaux
 - applicables à tous les types de traitements
 - non-compatibles avec le signal de photorécepteur
 - implantation in situ dans un pixel difficile
 - précision élevée
 - parallélisme explicite par la programmation

Propriétés fondamentales de systèmes digitaux

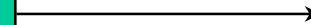
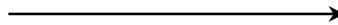
- Bonne qualité de données initiales est nécessaire
 - Conversion A/N de précision
 - Régularisation nécessaire (conditionnement)
- Performance finale est variable
 - Dépendance de la quantité de données à traiter
 - Condensation d'information nécessaire



Si $s2$ peut être amplifié de 100 fois, on retrouve $S/B=50\text{db}$!!

../..

1 millions de
données/image



2,5 images (action) de sortie
par seconde

100 mille
données/image



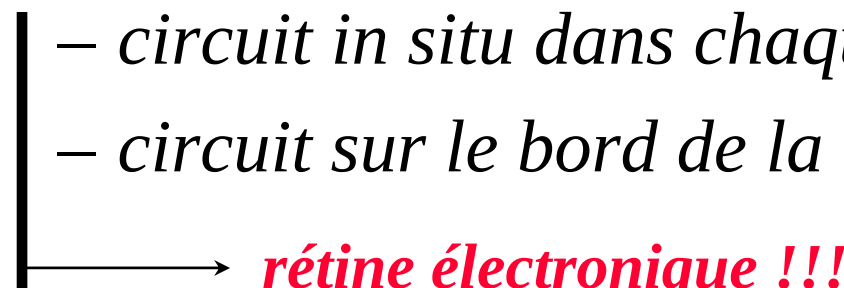
25 images (actions) de sortie
par seconde

Une condensation (pré-sélection de données) peut augmenter
la puissance équivalente d'une machine numérique

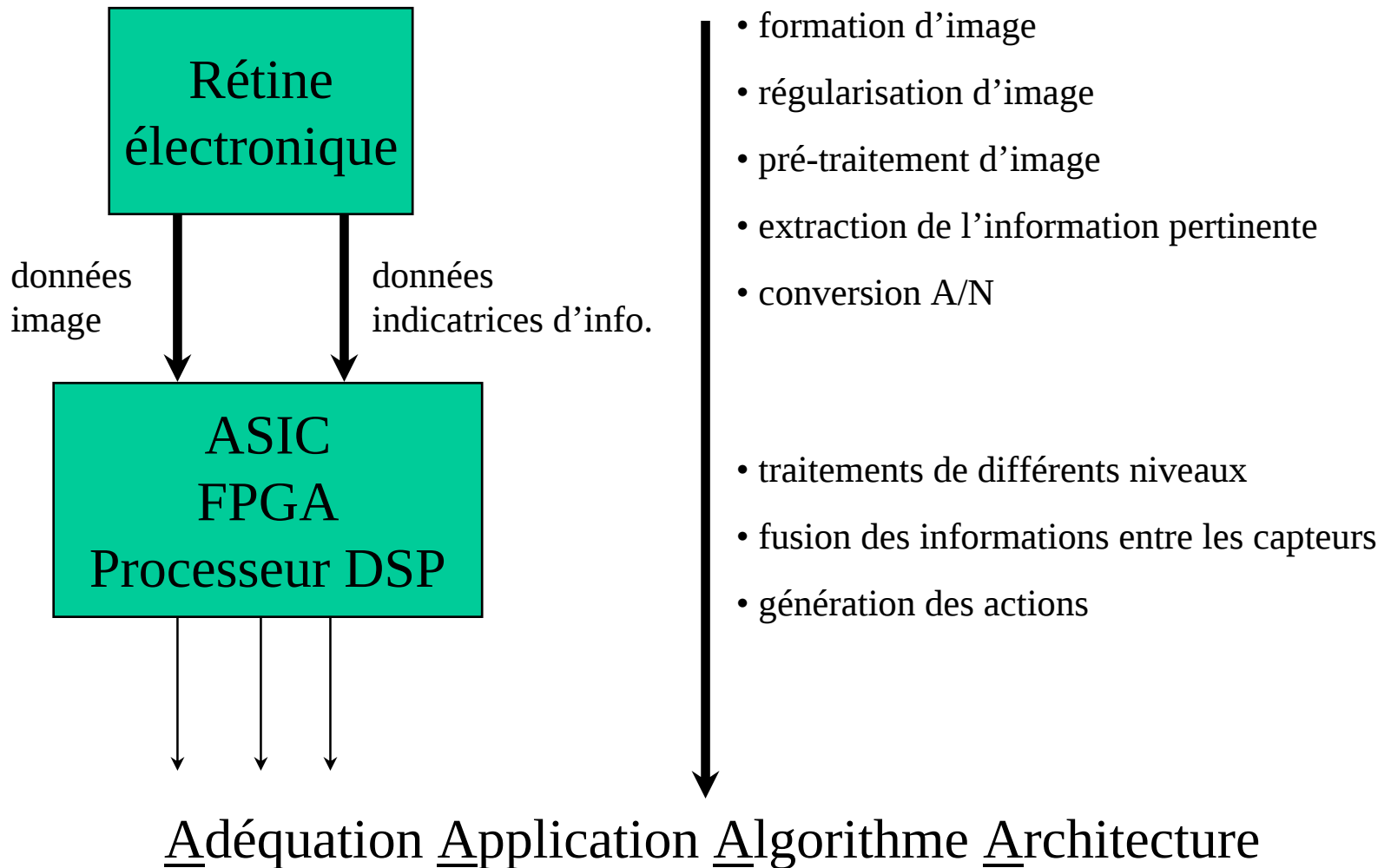
Conclusion

- Traitement analogique
 - Conditionnement du signal d'image
 - Préservation de l'information visuelle
 - Signalisation de l'information recherchée
 - Condensation des données
- Traitement digital
 - Analyse d'image
 - Traitements haut niveau & symboliques

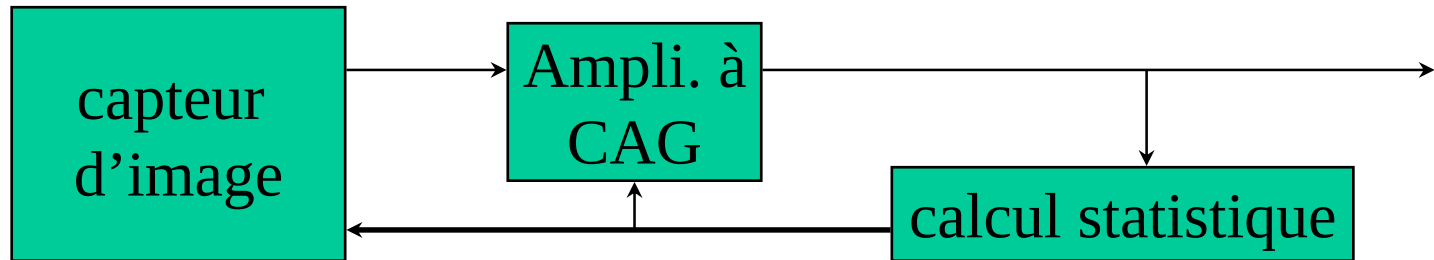
Qui peut faire cette pré-sélection des données

- Circuits digitaux
 - processeur massivement parallèle
 - circuit ASIC (FPGA) intégré
 - off-chip du sensor
- Circuits analogiques
 - circuit sur la sortie analogique du sensor
 - *circuit in situ dans chaque pixel (CMOS)*
 - *circuit sur le bord de la matrice (CMOS/CCD)*

Approche à la rétine électronique



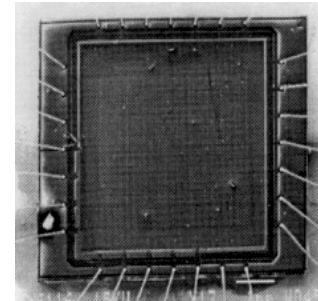
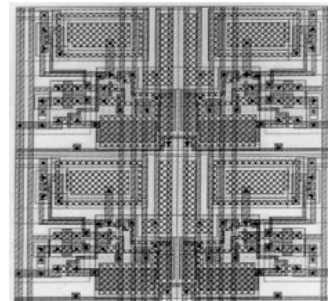
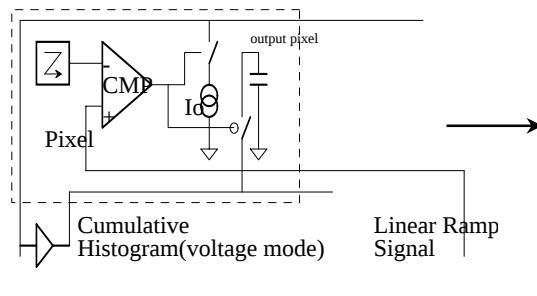
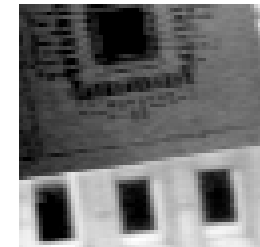
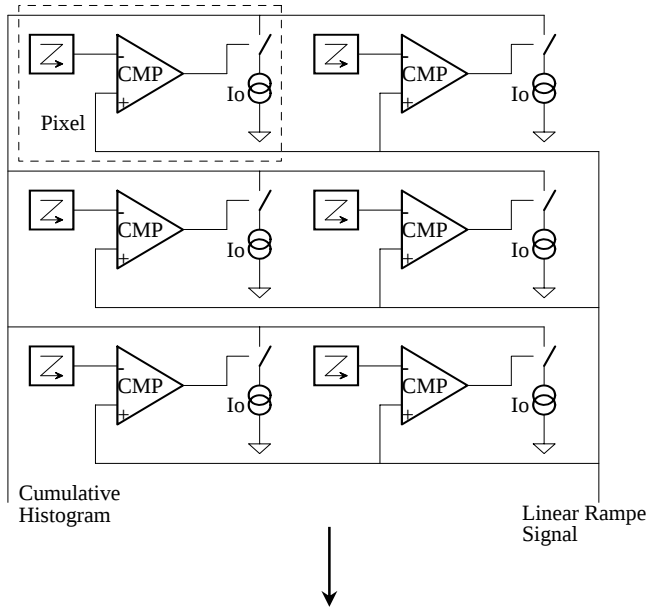
Régularisation d'image



— Structure classique —

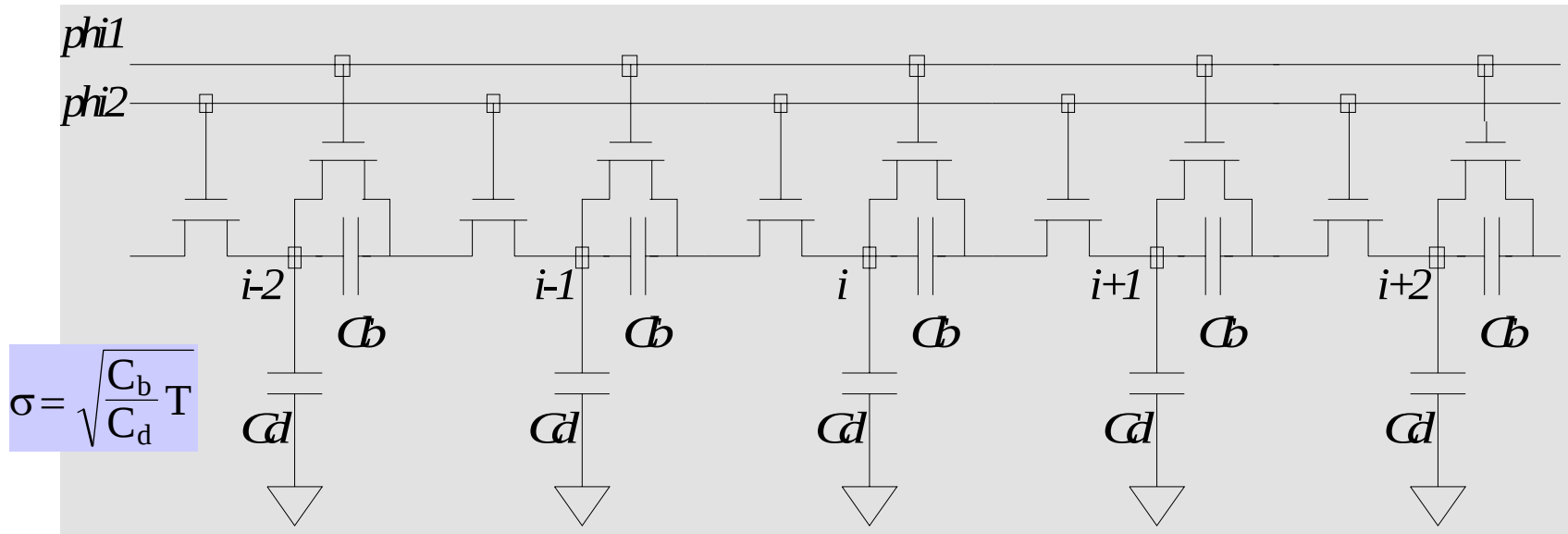
- Problèmes dans une caméra classique
 - absence de retours direct sur les pixels
 - délais de la contre-réaction
 - problèmes des saturations locales

Si elle se fait en analogique ?



Régularisation *in situ* par l'égalisation de l'histogramme

Filtrage spatial

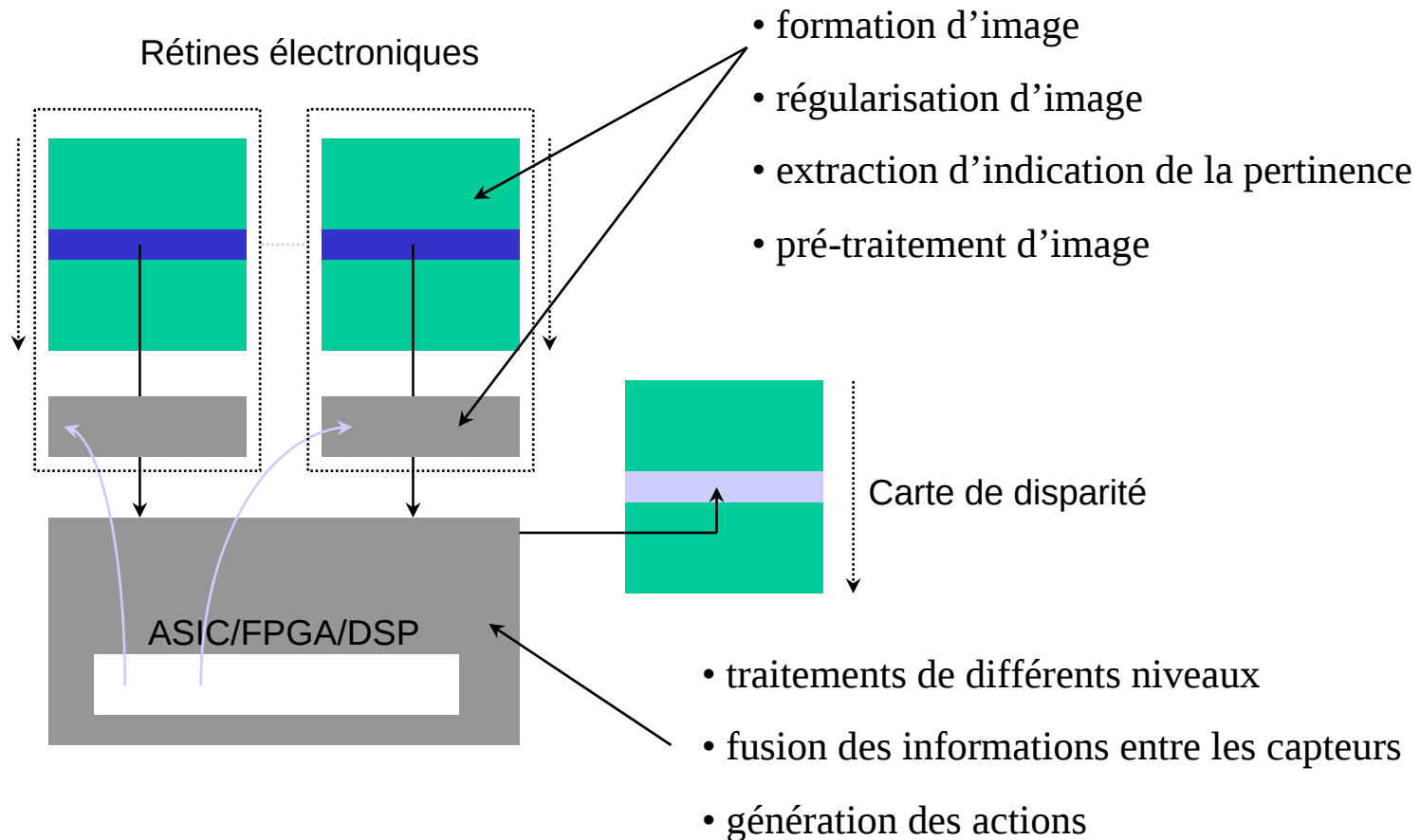


- deux condensateurs et deux transistors par noeud
- contrôlés par deux phases d'horloge sans recouvrement
- noyau Gaussien contrôlé par le nombre de coup d'horloge et le rapport C_b/C_d

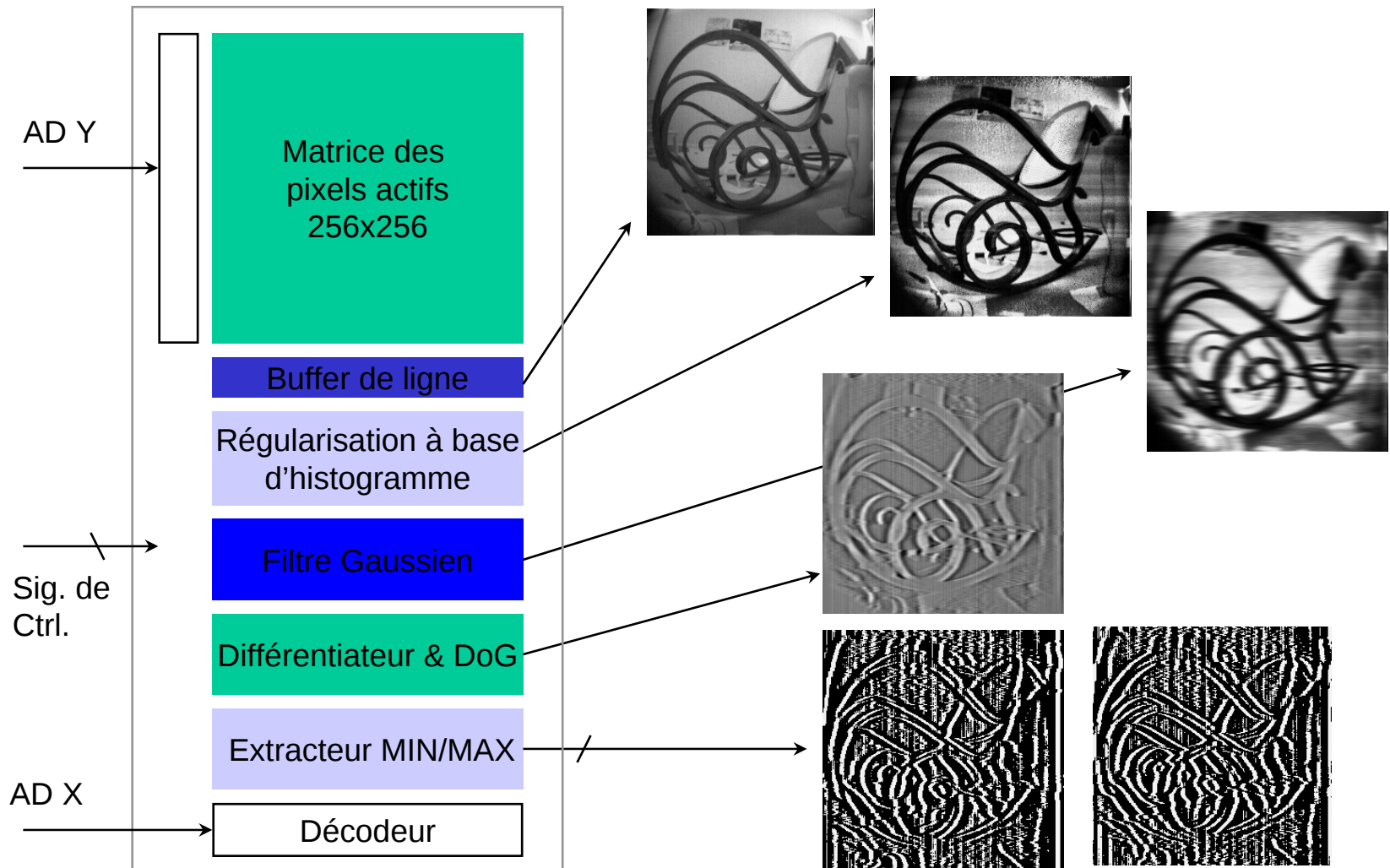
Filtre Gaussien capacitif

Système de stéréovision à base des rétines

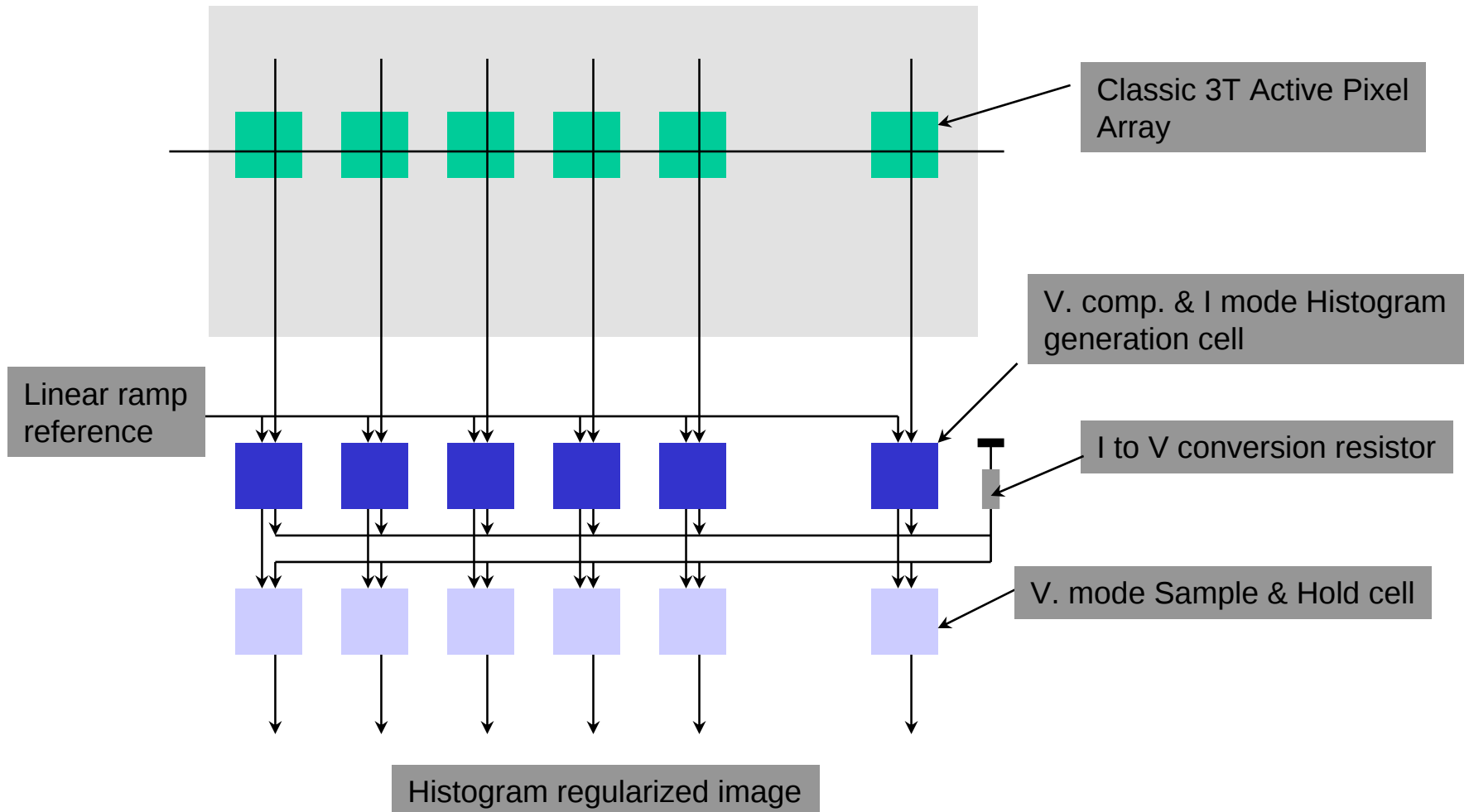
- un exemple



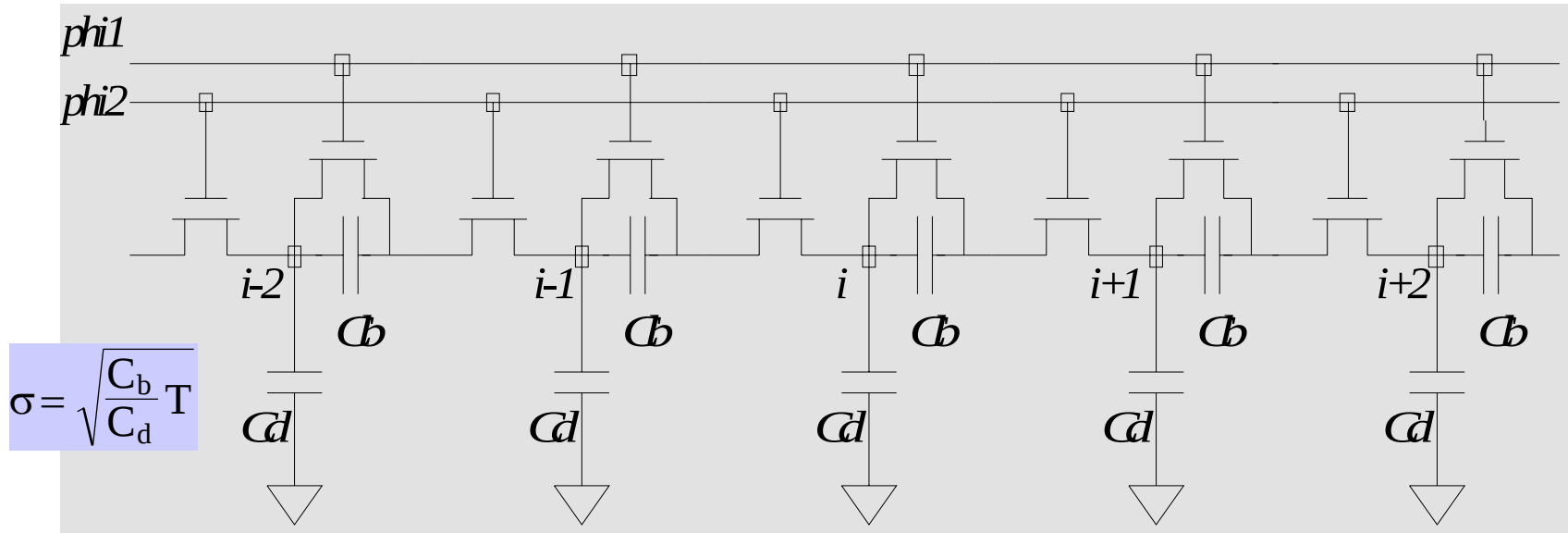
Rétine électronique CMOS



Régularisation en ligne

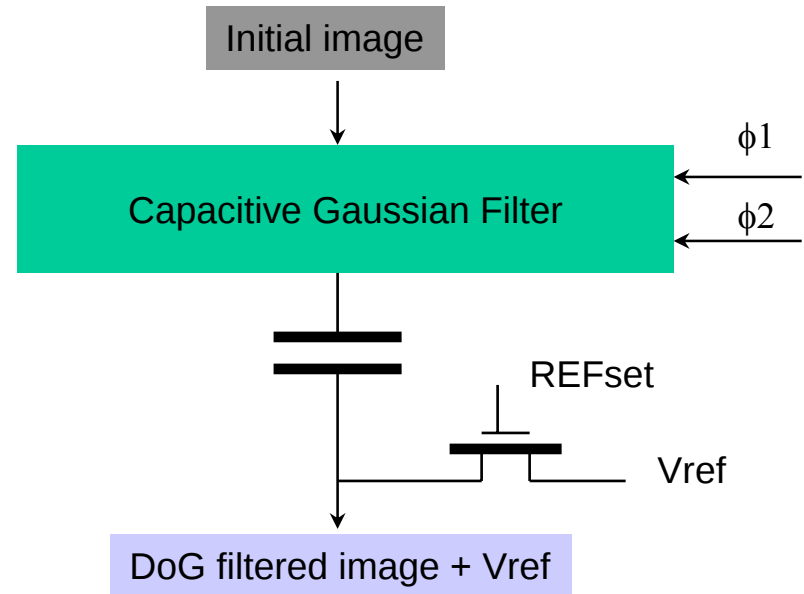
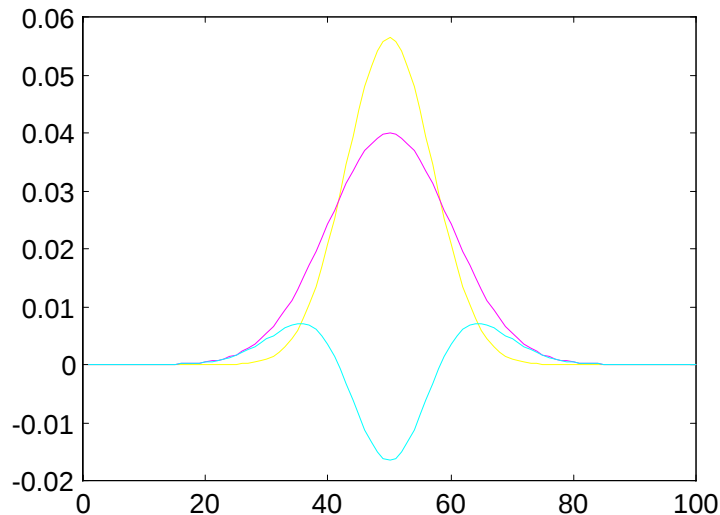


Filtre Gaussien analogique

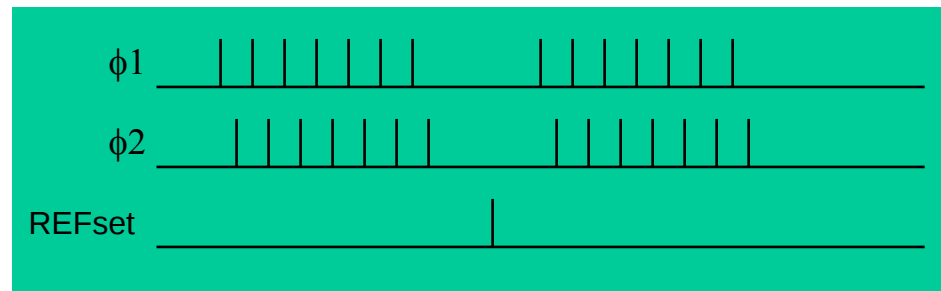


- deux condensateurs et deux transistors par noeud
- contrôlés par deux phases d'horloge sans recouvrement
- noyau Gaussien contrôlé par le nombre de coup d'horloge et le rapport C_b/C_d

Filtre DoG analogique



$$\text{DoG}(x, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} - \frac{1}{\sqrt{4\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{4\sigma^2}}$$



Extracteur des points MAX/MIN

Différents types de primitives

- régions seuillées
- points de zero-crossings
- segments d'extrema

Avantages:

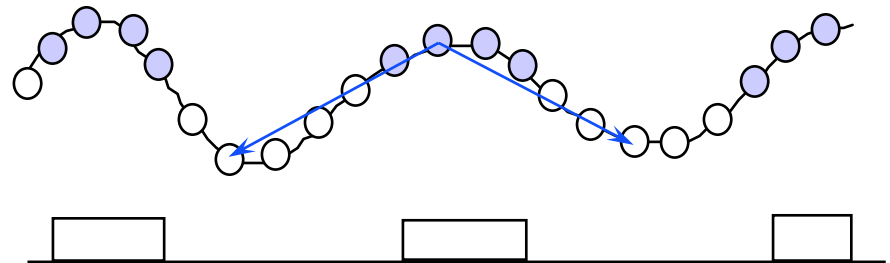
- plus stable que les autres critères
- implantation facile en circuit analogique

Algorithme d'extraction :

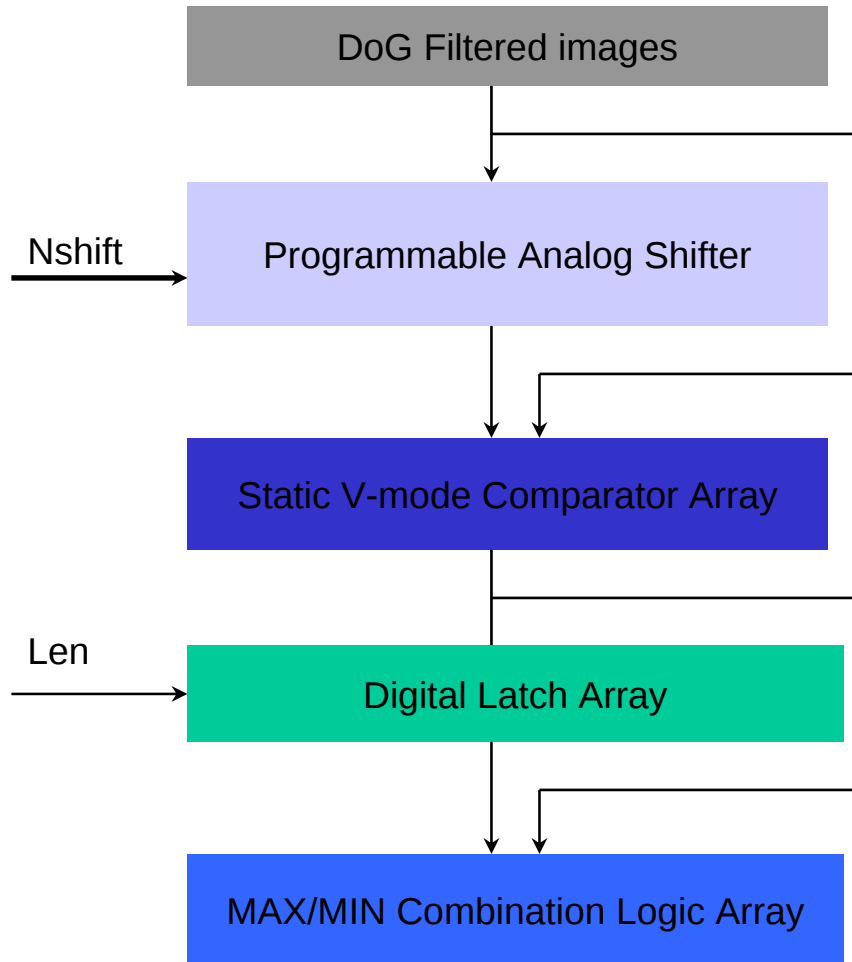
Utilisant une recherche locale dans un rayon délimité par le disque négatif du champ récepteur du filtre DoG

Exemple : detection de MAX

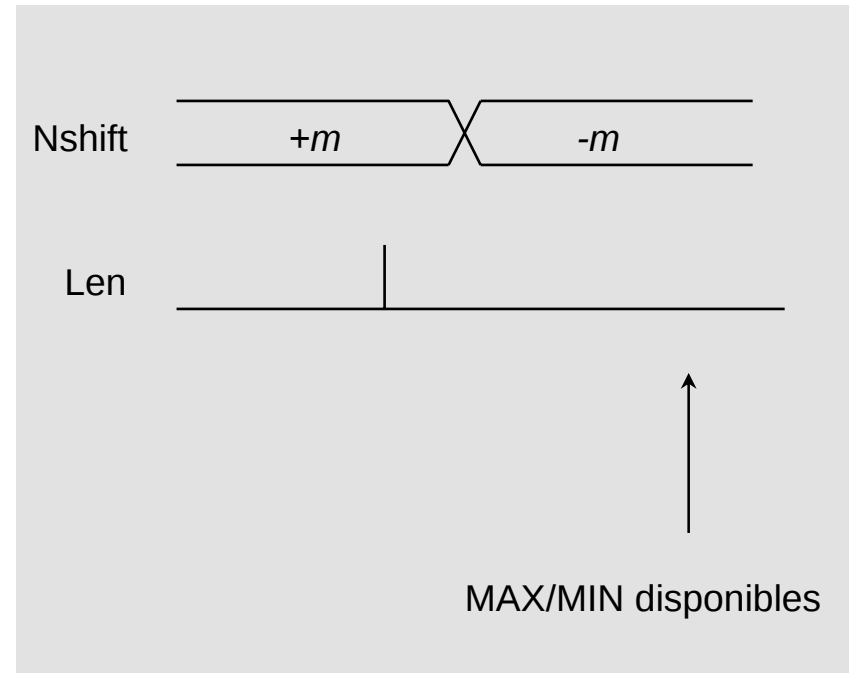
- deux comparaisons bilatérales pour chaque pixel
- réponses en segment
- largeur de segment ~ rayon de recherche



.../...



Carte des points MAX/MIN



Résultats de simulation



Image initiale

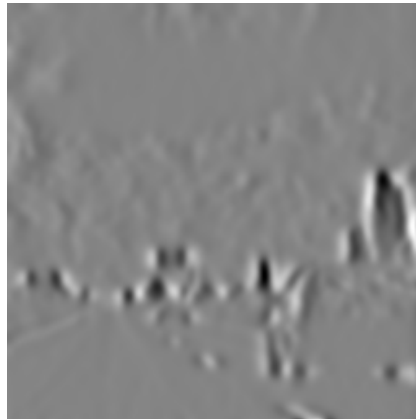
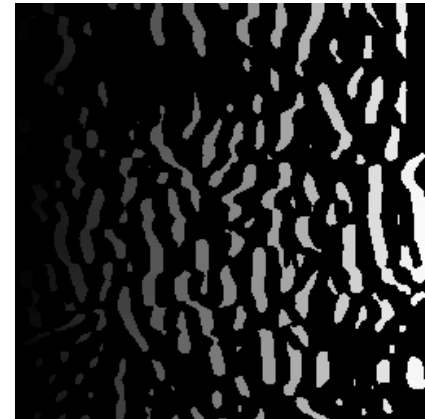
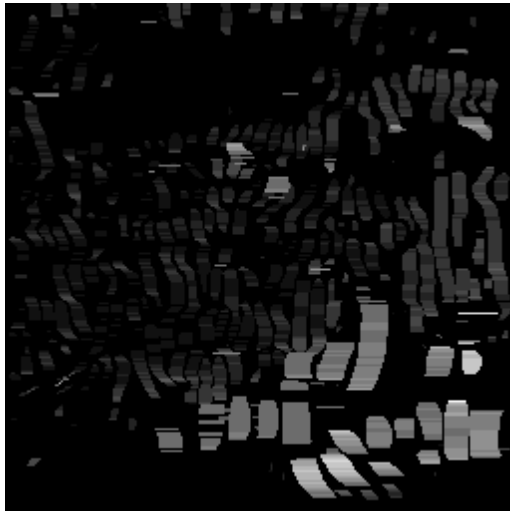


Image filtrée



MAX/MIN extraits

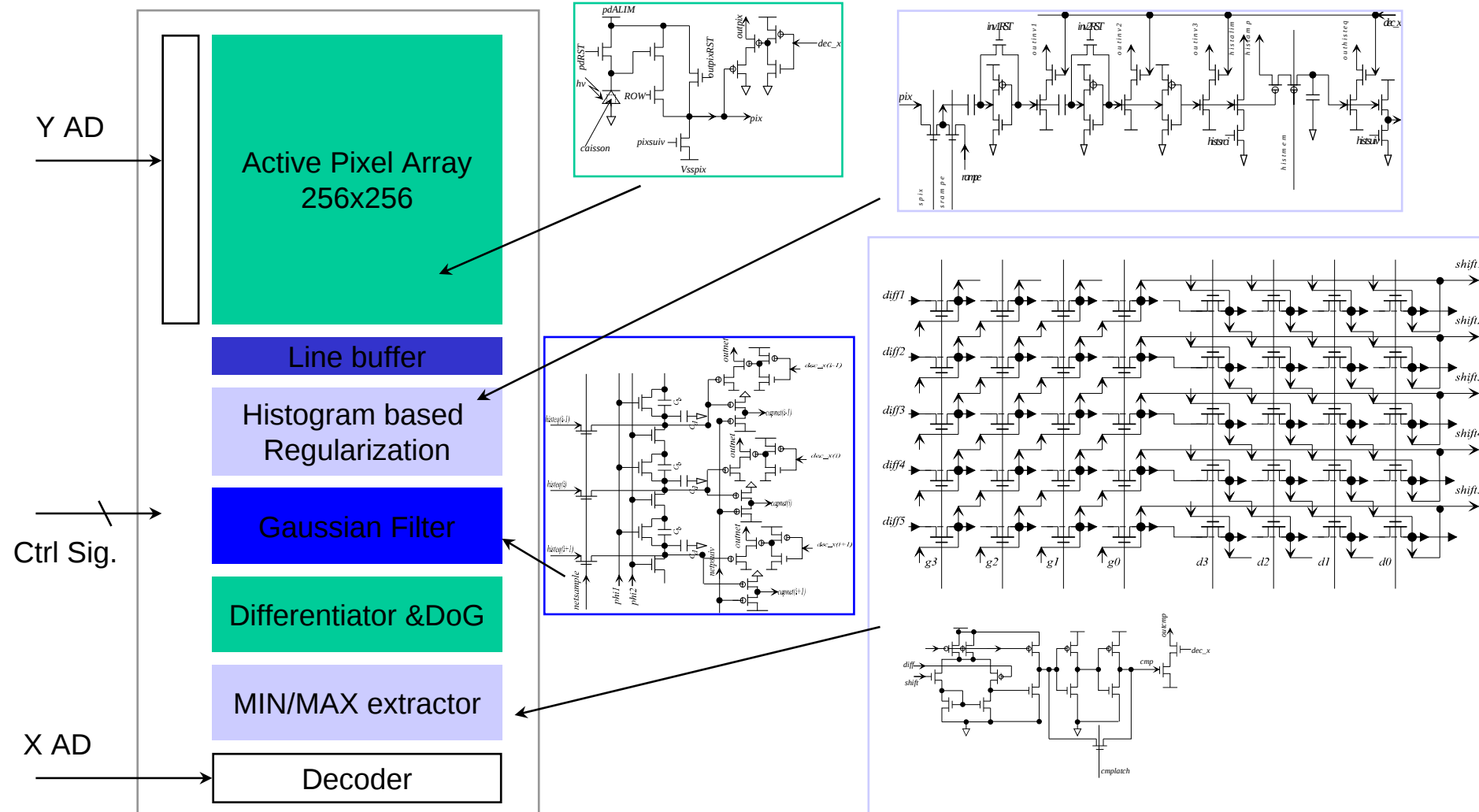


Carte des disparités



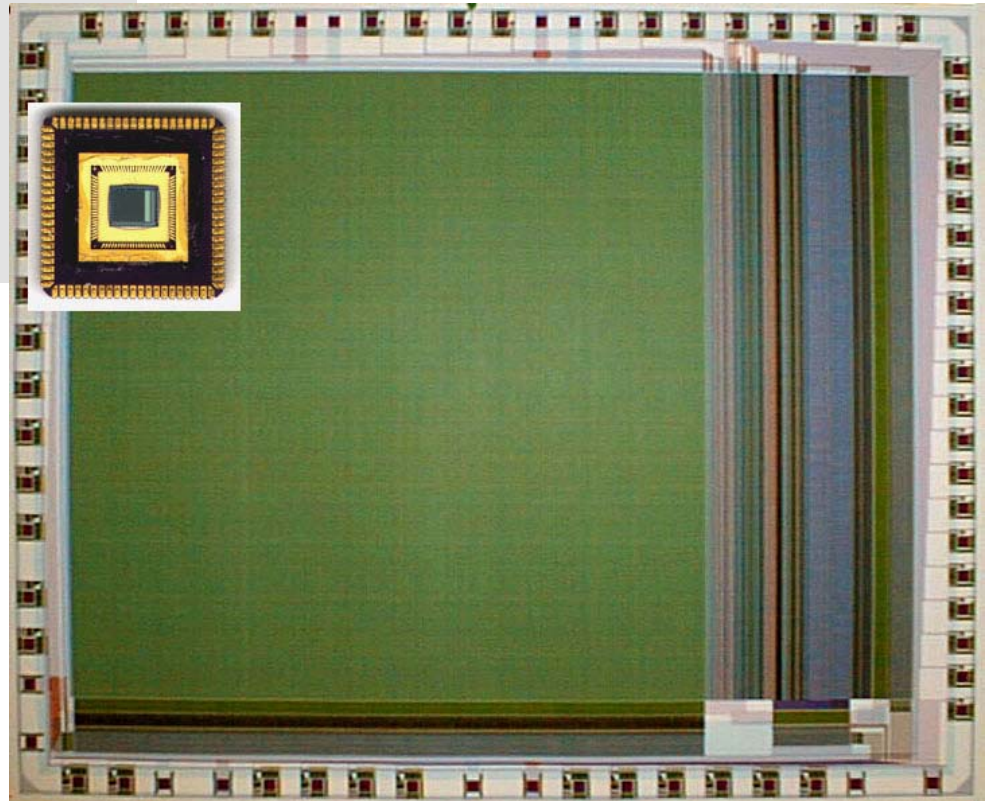
Carte des disparités/Image initiale

Structure de la rétine



Prototype et caractéristiques

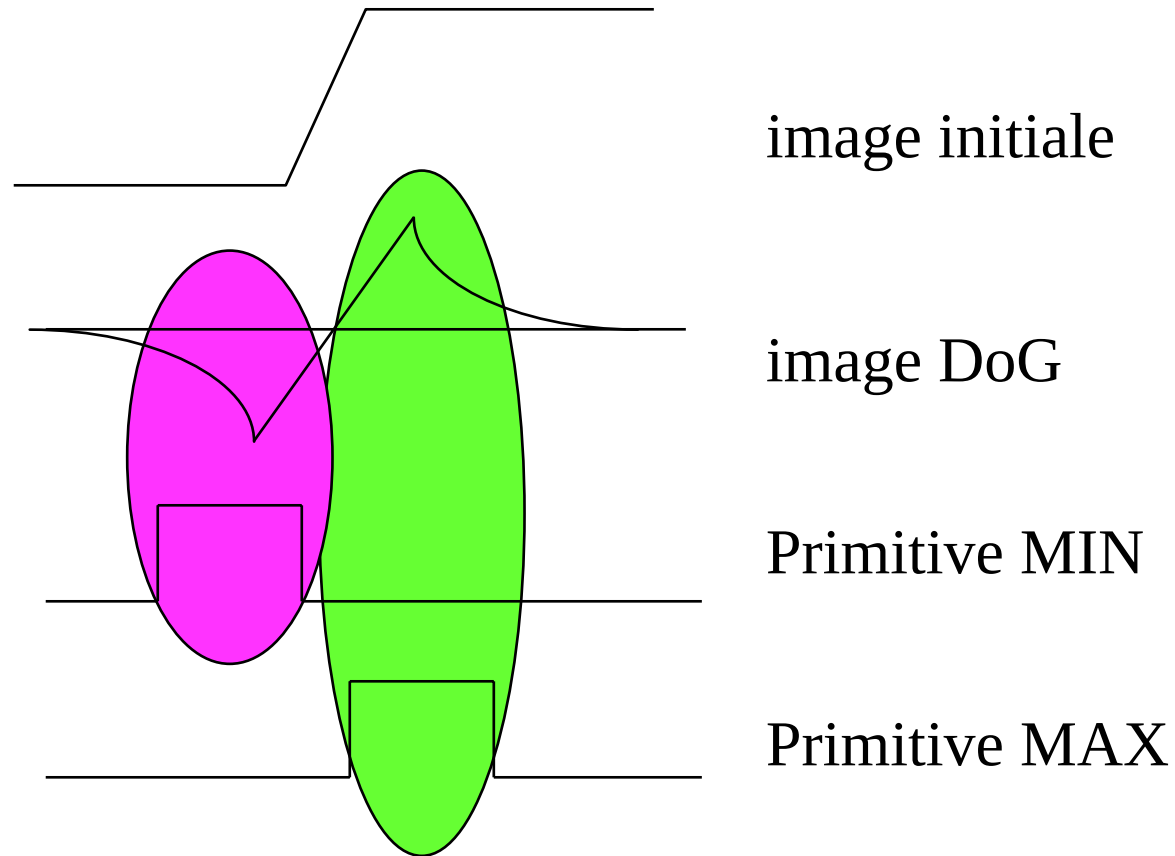
- Technologie CMOS 0.8um 2P2M
- Pas du Pixel 20umx20um
- Surface du chip 7mmx7mm
- Support LCC86
- Conçu sous L-edit/Win95
- Fabriqué via CMP
- Rendement fonctionnel 100%



../..

- Consommation : 40mA@5V
- Facteur de remplissage : 42.74%
- Sensibilité optique : 6.4V/lux.s
- Niveau de saturation : 600mV
- Plage dynamique : >52dB
- Bruit aléatoire : <1.5mV
- Bruit spatial fixe : 7.5mV
- BSF pour régularisateur à la sortie : 13mV
- Temps de traitement (ligne) : < 64uS
- Opération pipe-line compatible TV

Fusion stéréoscopique à l'interpolation guidée par rétine



../..

- Appariement
 - mettre en correspondance les primitives D/G qui se superposent
- Calcul de la disparité
 - par estimation de la différence de position des primitives
 - par interpolation locale sur les images initiales guidée par les primitives

Avantages

- Traitement ultra rapide pour une précision de l'ordre du pixel
 - détection grossière d'obstacle
- Traitement efficace par une interpolation locale guidée
 - les primitives = 10% du nombre total de pixels
 - traitement focalisé sur les points pertinents de l'image
 - évaluation précise d'un obstacle détecté

Exemples préliminaires



Image gauche



Image droite

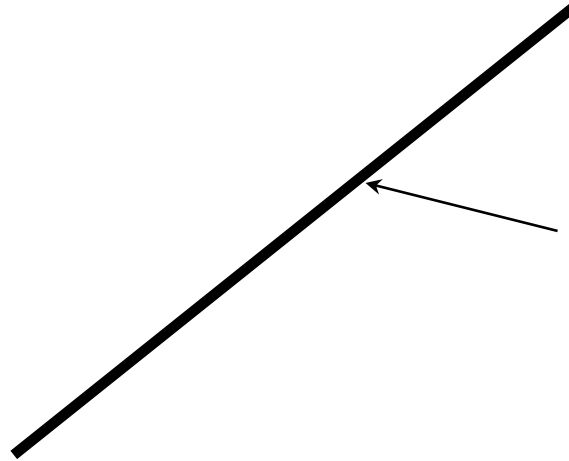


Disparité avec l'interpolation locale

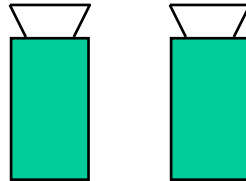


Disparité sans l'interpolation locale

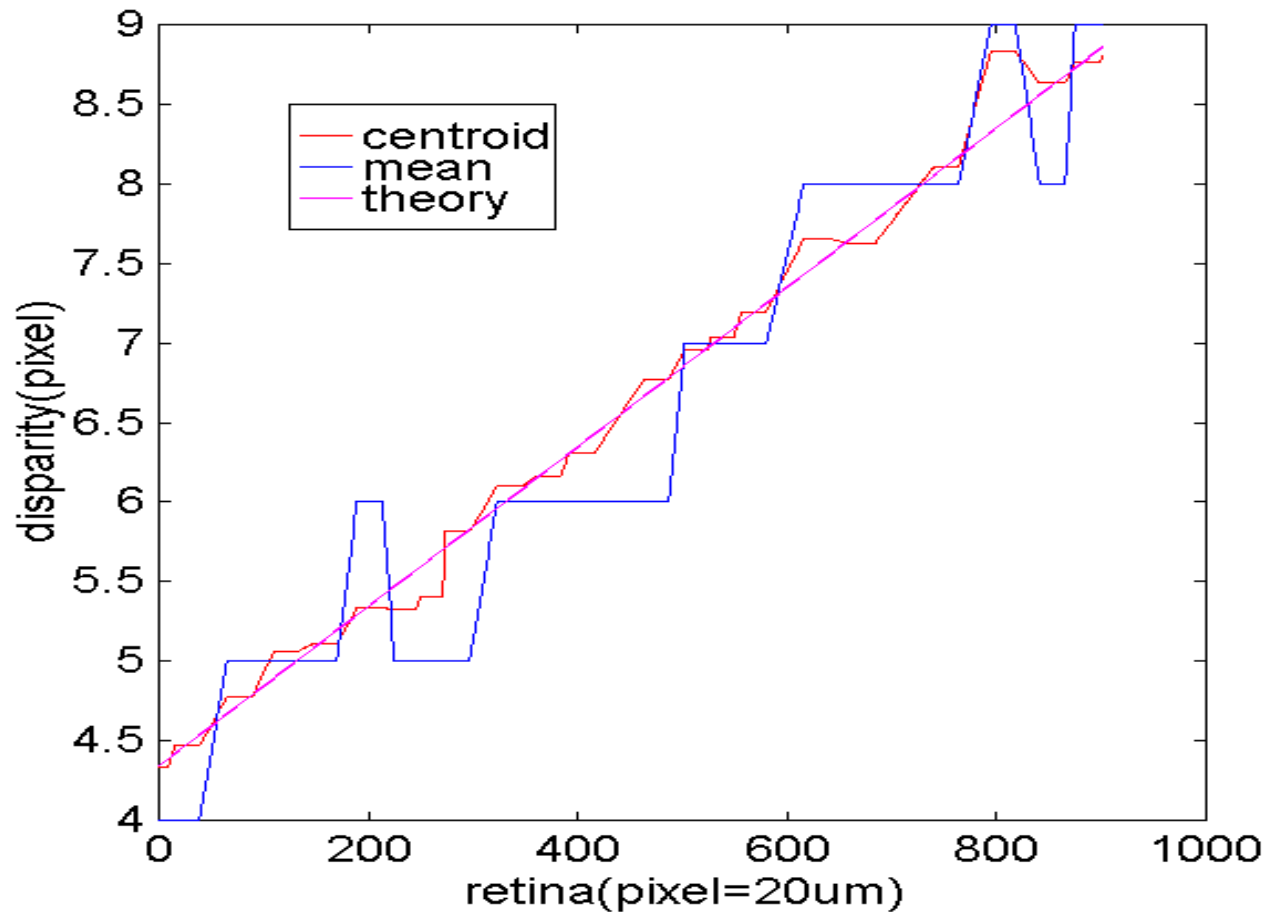
.../...



surface avec
des points N/B aléatoires



../..



précision sous-pixel pour l'interpolation locale guidée

Conclusion

- Nous présentons une approche d'optimisation globale pour une machine de vision artificielle à base de rétine électronique;
- Cette approche conjugue les traitements analogiques rétinien et les traitements digitaux classiques;
- Dans cette optique, le rôle conceptuel d'une rétine électronique est de guider les traitements digitaux sur les régions riches en information utile;
- L'efficacité de cette approche doit s'inscrire dans une vision **A4 = Adéquation Application Algorithme Architecture**.
- Pour plus d'information : www-eph.int-evry.fr/~ni