



## Introduction au traitement numérique des images

### Acquisition d'une image optique

L. Beaudoin

<http://learning.esiea.fr/>

INF4034, 2014 -2015

# Plan

- 1 Introduction
- 2 Chaîne d'acquisition
- 3 Capteur numérique

# Plan: Introduction

## 1 Introduction

- Objectifs

## 2 Chaîne d'acquisition

## 3 Capteur numérique

# Objectifs de cette présentation

- **Définir** les différents maillons d'une chaîne d'acquisition d'images et leurs inconvénients
- **Comprendre** ce qu'est un capteur numérique et ses limites dans ses capacités descriptives d'une scène



# Plan: Chaîne d'acquisition

## 1 Introduction

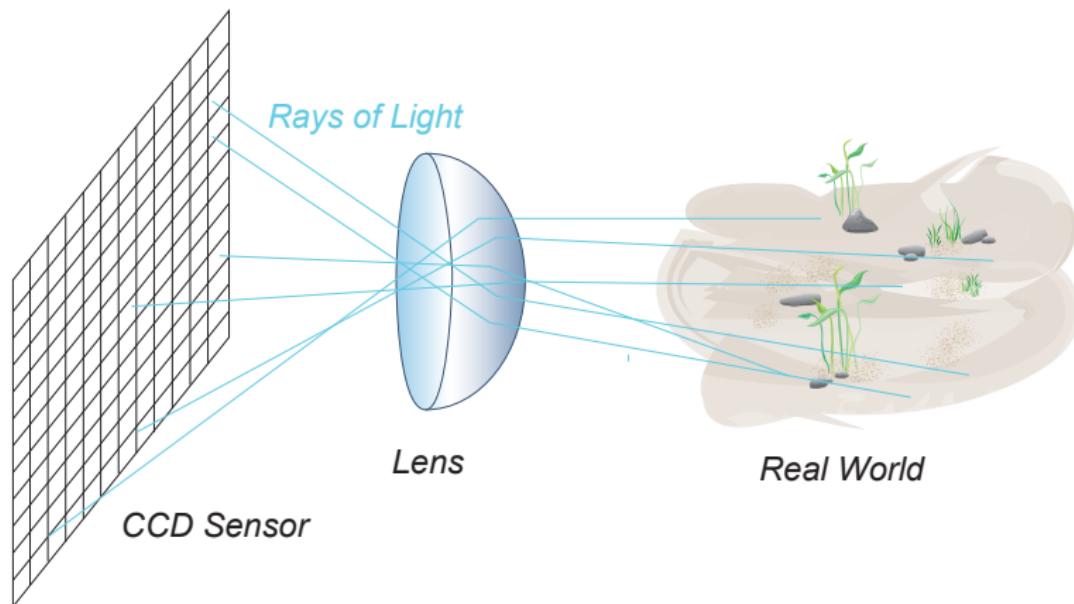
## 2 Chaîne d'acquisition

- Principe général
- Scène observée
- Système optique
- Capteur

## 3 Capteur numérique

## Schéma général

L'acquisition d'une image numérique suit le schéma général

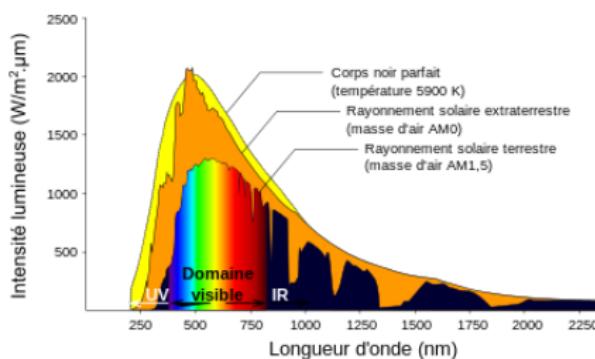


## Schéma général

- La scène observée renvoie un rayonnement issu d'une lumière naturelle (soleil) ou artificielle (flash) ou émet sa propre lumière (étoile ou IR thermique).
  - Le système optique concentre le rayonnement reçu de la scène pour le capteur.
  - Le capteur forme une image de la scène à partir de ce rayonnement.

## Rappels sur le spectre visible

La lumière visible est l'extrait du spectre solaire disponible à la surface terrestre sensible à l'œil humain.

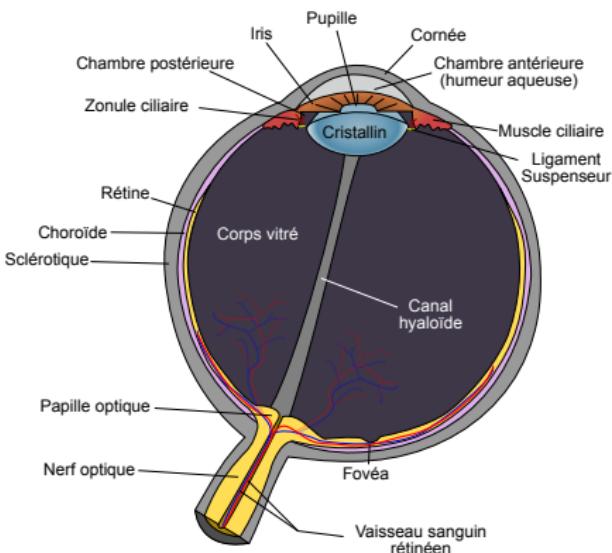


(source Wikipedia)

couleur	longueur d'onde visible (nm)
violet	380 - 450
bleu	450 - 495
vert	495 - 570
jaune	570 - 590
orange	590 - 620
rouge	620 - 750

## L'œil humain

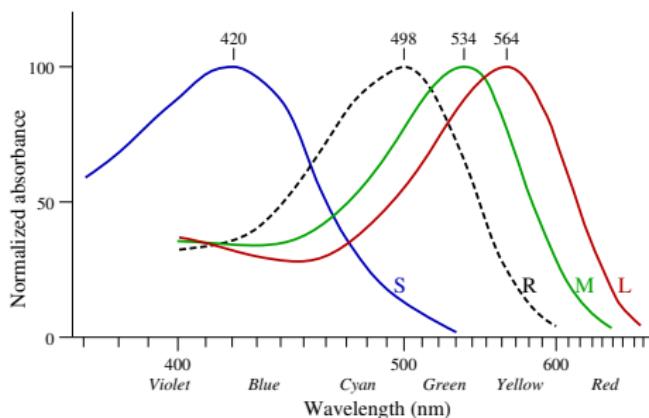
- L'optique est assurée par le cristallin (lentille) et la pupille (diaphragme).
  - La couche sensible à la lumière de l'œil s'appelle la rétine.
  - L'œil fonctionne en synergie complète avec le cerveau. La connexion se fait via le nerf optique.



(source Wikipedia)

## Les récepteurs de la rétine

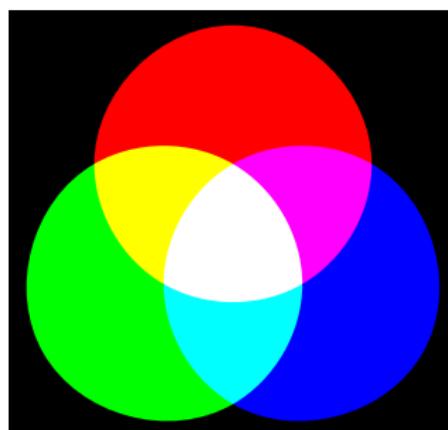
- Les cellules sensorielles de la rétine sont composées de cônes (vision diurne) et de bâtonnets (vision nocturne).
  - 3 type de bâtonnets, centrés sur le bleu, le vert et le rouge, permettent de couvrir tout le spectre visible.



Cônes (traits pleins)  
bâtonnets (traits pointillés)  
(source Wikipedia)

## Généralités sur les couleurs

Une couleur vue par l'œil humain est donc la synthèse additive de trois couleurs primaires pondérées : le rouge, le vert et le bleu (contrairement à la peinture où une couleur est obtenue par la synthèse soustractive des couleurs primaires cyan, magenta et jaune).

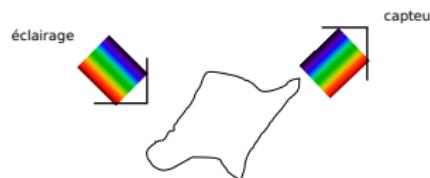


Synthèse additive des couleurs rouge, vert, bleu (source Wikipedia)

## Généralités sur les couleurs

La couleur d'un objet est donc la résultante des longueurs d'onde non absorbées par l'objet éclairé !

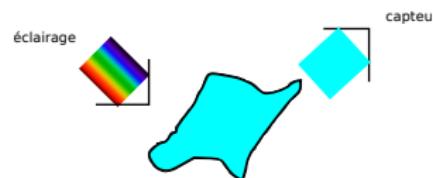
- Objet blanc : tout est réfléchi



- Objet noir : tout est absorbé



- Objet bleu : seul le bleu est réfléchi



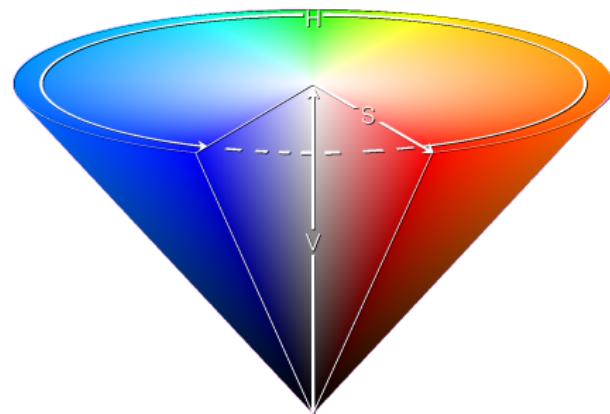
## Espaces colorimétriques

Un espace colorimétrique est un espace de dimension 3 contenant toutes les couleurs du domaine visible. Parmi eux :

- Espace RGB : toute couleur est décomposée sur le vecteur de ses valeurs en RGB. L'inconvénient principal est que cette représentation est très sensible aux variations des conditions d'observation (passage d'un nuage).
  - Espace HSV (ou TSL) : toute couleur est décomposée en sa Teinte (Hue), sa Saturation (sa pureté) et sa Luminance (Value, son intensité). Dans cette représentation, les variations des conditions d'éclairage n'impactent que la coordonnée de Luminance (V).

## Espaces colorimétriques

- Espaces XYZ, HSL, HSI... Chacun avec ses avantages et inconvénients.
  - Aucun espace n'est parfait ! Par contre, ils sont tous équivalents (i.e. les coordonnées en RGB, HSV ou autre représentent tous exactement la même couleur). Le passage d'un espace à l'autre se fait par des transformations mathématiques.



## Espace TSV/HSV (source Wikipedia)

# Effet de l'optique

Les systèmes optiques modifient la trajectoire des rayons lumineux pour que le capteur puisse faire une image. Ces modifications ont des conséquences notamment sur la géométrie des scènes observées.



# Effet de l'optique

Quelques informations à retenir :

- plus une optique est petite, plus les déformations sont importantes. Les images sont souvent recorrigées (i.e. recalibrées) a posteriori.
- plus le champ de vision est grand, plus les déformations sont importantes
- pas de système optique universel : chacun à ses avantages et inconvénients

## Capteur numérique versus analogique

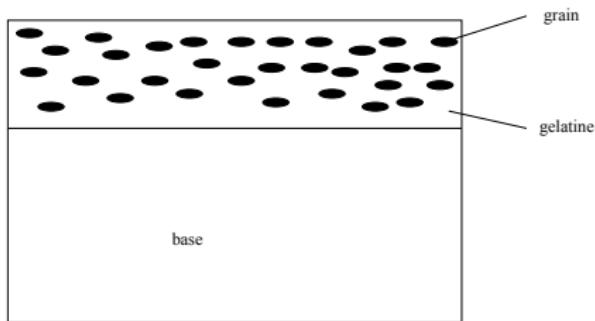
Un capteur est un dispositif permettant de transformer une grandeur physique (ici l'énergie dans le visible provenant de la scène observée via le système optique) en une grandeur utilisable (courant électrique, réaction chimique, nombre...).

- Si la grandeur utilisable est continue (i.e. infiniment précise), on parle de capteur analogique.
- Si la grandeur utilisable n'a qu'un nombre fini d'états possibles, on parle de capteur numérique.

# Capteur numérique versus analogique

- Capteur analogique
  - avantage : précision infinie
  - inconvénient : nécessite un support physique (pellicule photo)
- Capteur numérique
  - inconvénient : précision limitée
  - avantage : support dématérialisé, donc manipulable par un ordinateur, facilement (et exactement) transférable (révolution de l'imagerie spatiale militaire)
- En imagerie, les capteurs (analogiques ou numériques) font une transformation radiométrique et géométrique !

# Capteur analogique : la pellicule photo



Coupe d'une pellicule photographique

Une pellicule est composée d'une émulsion de gélatine riche en grains d'un sel d'argent et déposée sur une base. Plus il y a de photons reçus, plus nombreuses sont les réactions chimiques photosensibles qui fixent dans la gélatine des molécules d'argent opaques.

## Capteur analogique : la pellicule photo

Les différentes phases pour obtenir une photo sont :

- l'exposition : réaction photochimique avec les molécules d'argent éclairées (appelées germes). On obtient une image latente (i.e. ré-exposable).
- le développement : le révélateur va agir comme un amplificateur chimique des germes (gain de  $10^6$ ).
- le fixage : on élimine la majorité des molécules d'argent qui n'ont pas été exposées (image définitive).

## Capteur analogique : la pellicule photo

- Le processus précédent permet d'obtenir une image où les parties les plus sombres sont celles qui ont été les plus illuminées. On obtient donc un négatif.
- Pour obtenir un positif (la photographie finale), il suffit de faire un négatif... du négatif !



# Surimpression



L'homme à la tête en caoutchouc (1902)

## Capteur analogique : la pellicule photo

L'avenir de la photographie chimique (analogique) ?

- Comme toute mesure analogique, la photographie est réputée plus fine, plus précise... Donc plutôt réservée aux professionnels et artistes car elle nécessite technique et talent pour exprimer sa vraie plus value.
- Elle ne permet pas de s'intégrer nativement au monde numérique.
- Les constantes évolutions du numérique réduisent constamment la barrière qualitative avec l'analogique (échec industriel de Kodak).

# Plan: Capteur numérique

1 Introduction

2 Chaîne d'acquisition

3 Capteur numérique

- Les capteurs numériques les plus utilisés
- Discrétisation radiométrique
- Retour sur la télédétection spatiale

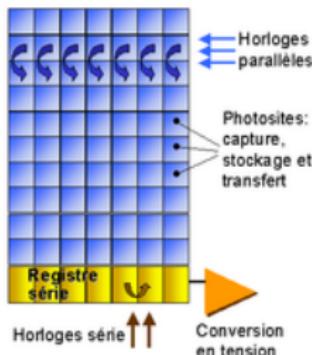
## CCD et CMOS

Les capteurs les plus utilisés en imagerie numérique sont :

- les CCD pour Charge-Coupled Device ou dispositif à transfert de charge (travaux de Smith et Boyle, Bell Lab., 1969 et nobélisés en 2009). Les photons sont convertis en électron pendant l'exposition, puis chaque charge de chaque photocapteur migre de proche en proche jusqu'au registre final.
- les CMOS pour Complementary metal-oxide-semiconductor associent à chaque photosite un convertisseur en tension : contrairement au CCD, il n'y a pas de transfert de charge.

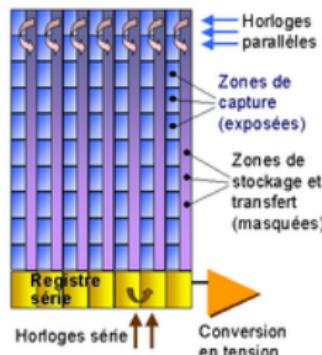
# Les différents CCD

- Un CCD plein cadre (full frame) utilise les photosites pour la migration
- Un CCD interligne entrelace une ligne de stockage pour une ligne de photosite



CCD plein cadre

wikipédia

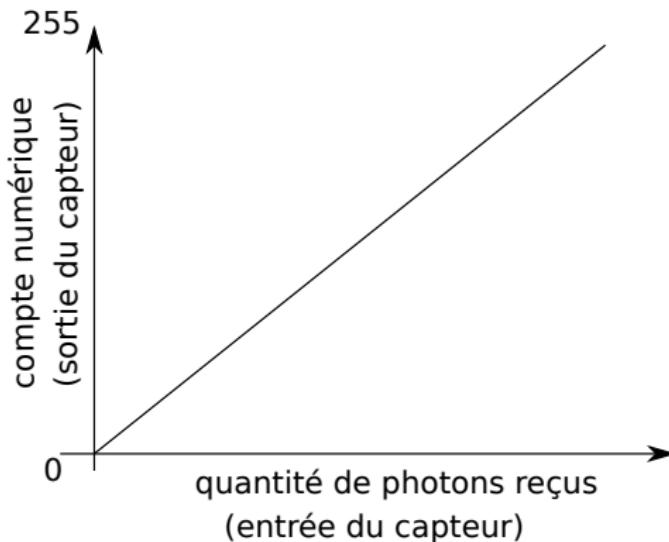


CCD interligne

wikipédia

## Radiométrie et capteur numérique

Comme dans le cas de l'analogique, le capteur numérique donne une réponse (un compte numérique) proportionnelle à la quantité de lumière (radiométrie) reçue par chaque cellule photosensible.



## Perte de finesse

Un nombre limité de niveaux radiométriques entraîne une perte de finesse radiométrique. En pratique, les plans images sont codés sur 8 bits pour le gris et 24 bits pour la couleur ( $3 \times 8$  bits).



256 niveaux de gris



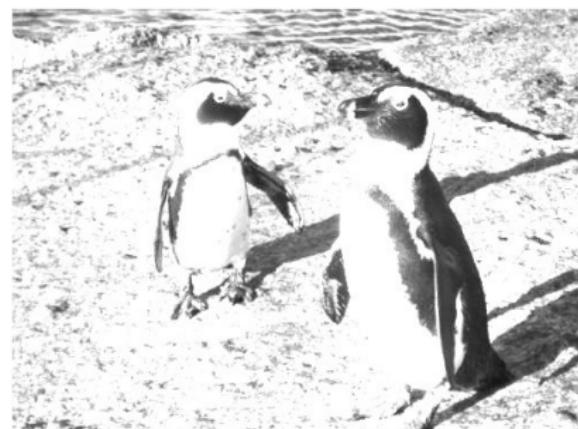
6 niveaux de gris (bien choisis)

## Gain et Offset

En pratique, il n'y a aucune raison qu'au moment de faire l'acquisition, la quantité minimum de photons reçue soit nulle ni que la quantité maximale corresponde au compte numérique 255. En conséquence, l'utilisation des 256 valeurs ne sera pas optimale !



Quantité maximale < 255  
(image peu contrastée)

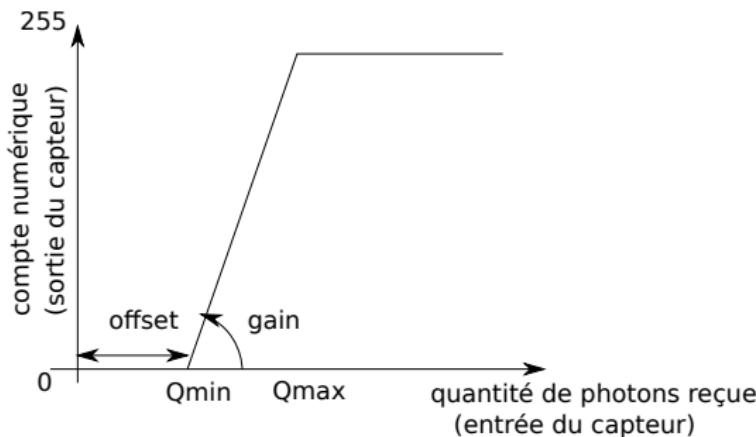


Quantité maximale > 255  
(image saturée)

## Gain et Offset

Pour obtenir le meilleur contraste, il faut donc :

- faire correspondre le compte numérique (CN) 0 à la quantité de photons minimale reçue ( $Q_{min}$ ) soit  $CN=0$  si  $Q < Q_{min}$
- faire correspondre le compte numérique 255 à la quantité de photons maximale reçue ( $Q_{max}$ ) soit  $CN=255$  si  $Q > Q_{max}$
- rester linéaire entre ces deux bornes soit  $CN=Gain \times Q + offset$



# Gain et Offset

Petite pause calculatoire : connaissant Qmin et Qmax, que valent Gain et offset ?

$$\begin{cases} 255 &= \text{Gain} \times \text{Qmax} + \text{offset} \\ 0 &= \text{Gain} \times \text{Qmin} + \text{offset} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{offset} &= -\text{Gain} \times \text{Qmin} \\ 255 &= \text{Gain} \times (\text{Qmax} - \text{Qmin}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{Gain} &= \frac{255}{\text{Qmax} - \text{Qmin}} \\ \text{offset} &= \frac{255 \times \text{Qmin}}{\text{Qmax} - \text{Qmin}} \end{cases}$$

## Gain et Offset

Les calculs précédents supposent que l'on connaisse à l'avance quelles vont être les valeurs réelles de Qmax et Qmin.

En pratique, le capteur numérique fait très souvent une nouvelle acquisition, calcule les valeurs Qmax et Qmin de celle-ci et adapte *a posteriori* les valeurs de Gain et offset !

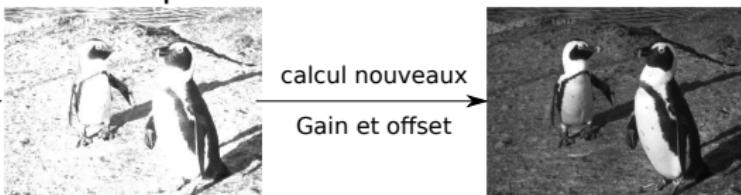
Cela explique pourquoi il faut un temps (plus ou moins long) d'adaptation à vos téléphones, appareils photo ou caméscopes lors de brusque changements de conditions d'éclairement !

# Gain et Offset

Quelques exemples :

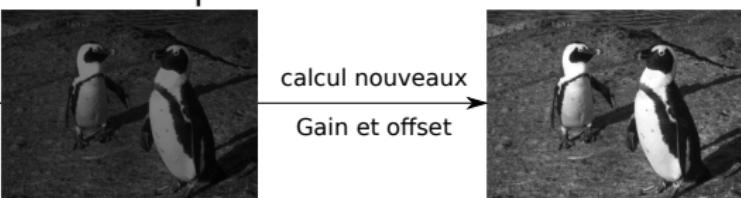
- passage d'un endroit sombre à plus lumineux

Gain et offset calculés en environnement sombre (Qmax faible)



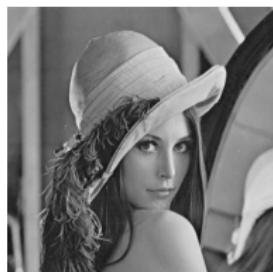
- passage d'un endroit lumineux à plus sombre

Gain et offset calculés en environnement lumineux (Qmax fort)

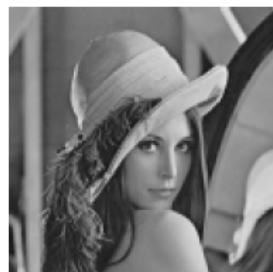


# Discréétisation spatiale

Comme pour la radiométrie, il y a un rapport direct entre la discréétisation spatiale (ou la résolution d'une image c'est-à-dire le nombre de pixels qui composent l'image) et la finesse (i.e. la qualité descriptive) d'une scène.



$512 \times 512$   
pixels différents



$128 \times 128$   
pixels différents



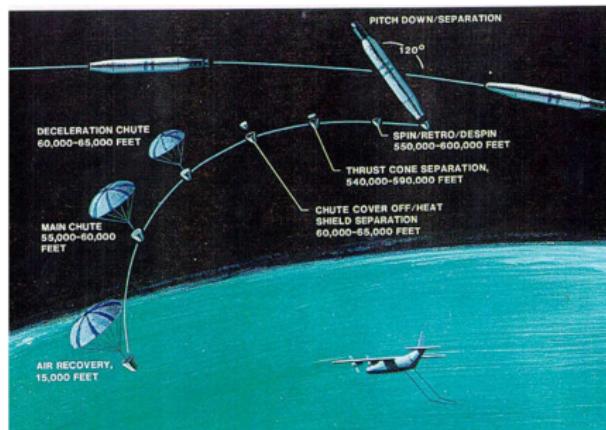
$64 \times 64$   
pixels différents



$32 \times 32$   
pixels différents

# Premières images analogiques !

Des images haute résolution ont été prises dès le début de la conquête spatiale. Ces images étaient des photographies, d'où le problème de la récupération de la pellicule !



wikipedia

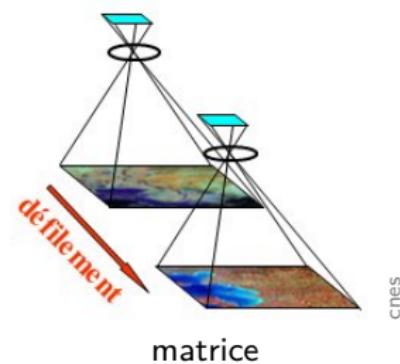
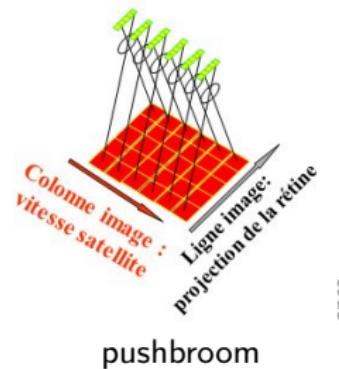
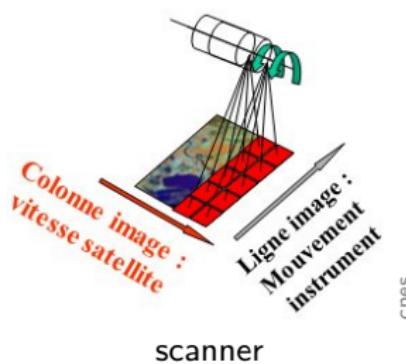


wikipedia

# Capteurs numériques spatiaux

Les grandes familles de capteurs spatiaux sont :

- les scanners composée d'une cellule photosensible rotative
- les pushbromms composée d'une ligne de cellules photosensibles
- les matrices (tableaux) de cellules photosensibles



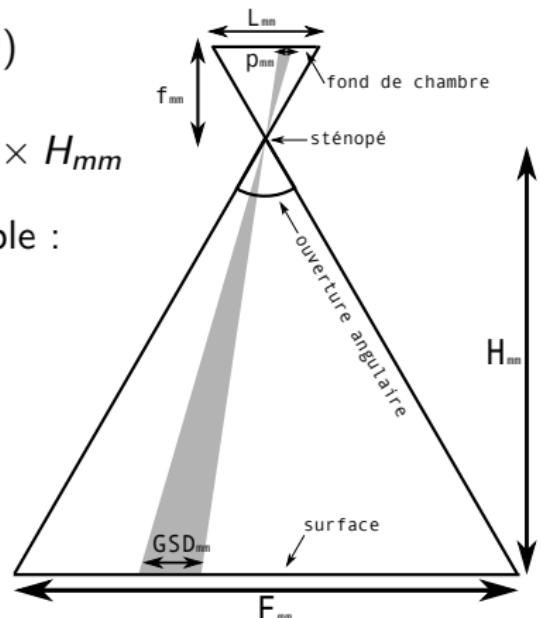
# Compromis GSD / Fauchée / Hauteur

- Taille de l'échantillon au sol (GSD)

$$GSD_{mm} = \frac{p_{mm}}{f_{mm}} \times H_{mm} = \frac{L_{mm}}{R_{pix} \times f_{mm}} \times H_{mm}$$

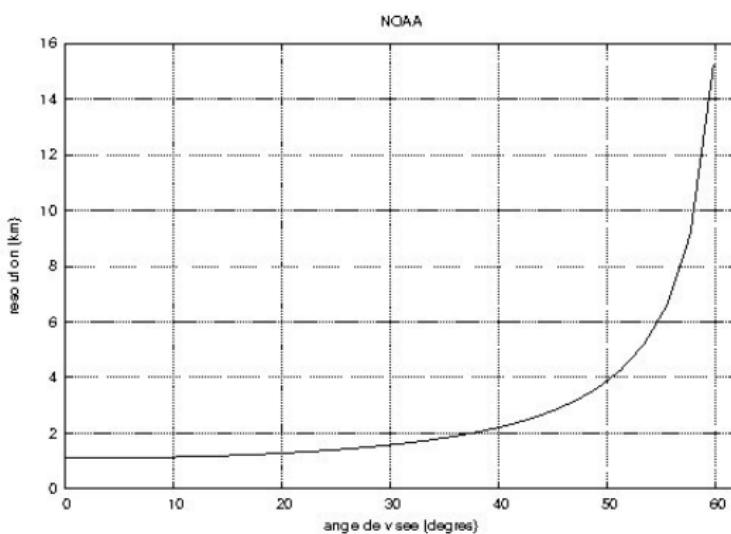
- Taille du plus petit objet identifiable :  
 $\sim 5 \text{ à } 10 \times GSD$
- Fauchée ( $F_{mm}$ )

$$\begin{aligned} F_{mm} &= R_{pix} \times GSD_{mm} \\ &= \frac{L_{mm}}{f_{mm}} \times H_{mm} \end{aligned}$$



# Incidence de l'incidence

La résolution spatiale est définie comme l'intersection entre le cône d'analyse d'une cellule photosensible avec la surface terrestre



- Plus on s'éloigne de la verticale (nadir), donc plus l'angle de visée (incidence) est grand, plus l'intersection couvre de surface donc moins la résolution est bonne
- avec un pushbroom, il n'y a qu'une déformation en ligne (et pas en colonne contrairement au cas matriciel)

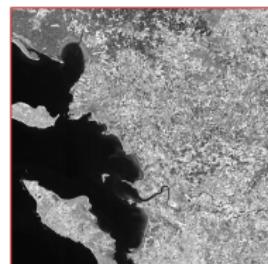
# Diversité de résolutions au sol

Type	Exemple	Hauteur	GSD	Fauchée	Nb pixels
Sat. géostat.	MSG	36 000 km	3 km	11 600 km	3720
Sat. polaire	SPOT	830 km	5 m	60 km	12 000 !
Sat. pol.HR	Worldview-1	496 km	0.5 m	17,6 km	35 170 !
Avion	Camera IGN	4 km	20 cm	800 m	4 000
Avion HR	Ultracam-Xp	300 m	1,8 cm	200 m	11 310
TBA	Compact num.	45 m	1 cm	40 m	4 000
TBA HR	Compact num.	22,5 m	0.5 cm	20 m	4 000

## Composition colorée

Comment représenter des informations multispectrales en une images ?

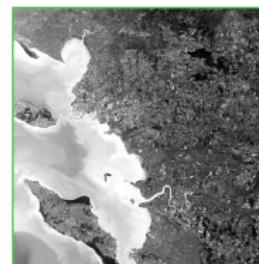
En affichant sur chaque canal rouge, vert et bleu une information différente !



acquisition bande IR  
affichage canal rouge



acquisition bande rouge  
affichage canal vert



acquisition bande verte  
affichage canal bleu



composition colorée

Question : en quelle couleur apparaît la végétation sur cette composition colorée ?