



# Capteurs imageurs et traitements bas-niveau

Cours 1 du module ES210  
"Traitements numériques et capteurs imageurs  
de nouvelle génération"

Guy Le Besnerais Philippe Cornic, ONERA/DTIM  
[philippe.cornic@onera.fr](mailto:philippe.cornic@onera.fr)



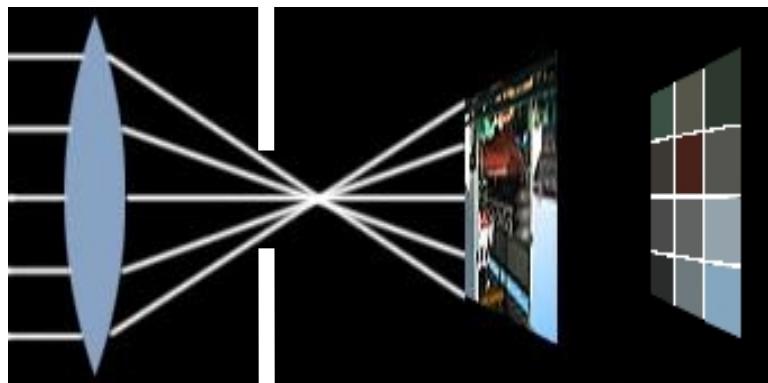
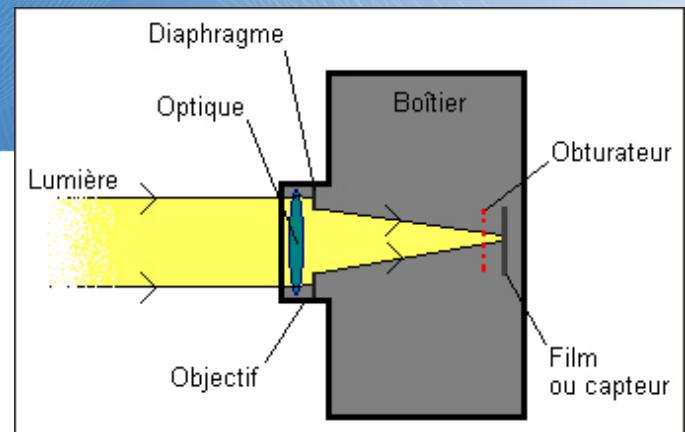
r e t o u r   s u r   i n n o v a t i o n

# Plan du cours 1

- **Schéma de principe d'un capteur imageur numérique**
- Système optique
  - Intermède : déconvolution
- Détecteur
  - Intermède : débruitage
- Étalonnage géométrique

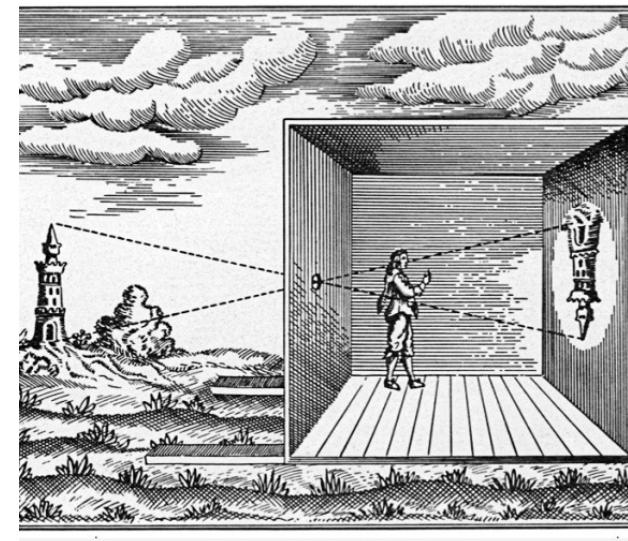
# Schéma de principe

- Simple et inchangé depuis l'argentique



Système optique :  
combinaison de lentilles

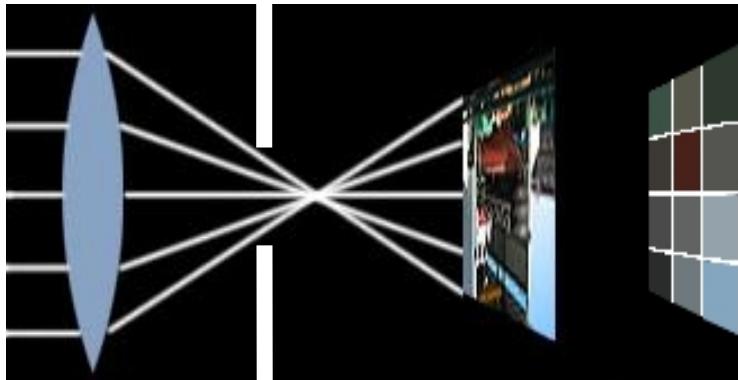
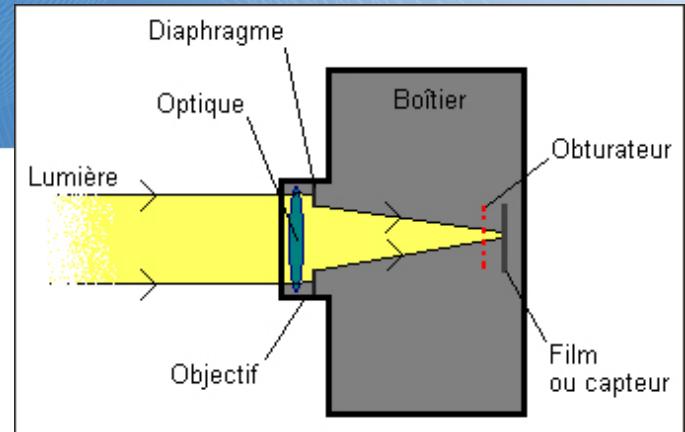
Détecteur



A 17th century camera obscura illustration

# Schéma de principe

- Simple et (quasiment) inchangé depuis l'argentique



Système optique :  
combinaison de lentille

Détecteur



Calculateur

# Plan du cours 1

- Schéma de principe d'un capteur imageur numérique
- **Système optique**
  - Intermède : déconvolution
- Détecteur
  - Intermède : débruitage
- Étalonnage géométrique

# Systèmes optiques

[www.zeiss.com/camera-lenses/en\\_us/  
camera\\_lenses/slr-lenses/aposonnart2135.html](http://www.zeiss.com/camera-lenses/en_us/camera_lenses/slr-lenses/aposonnart2135.html)



Représentation du futur E-ELT (42m)

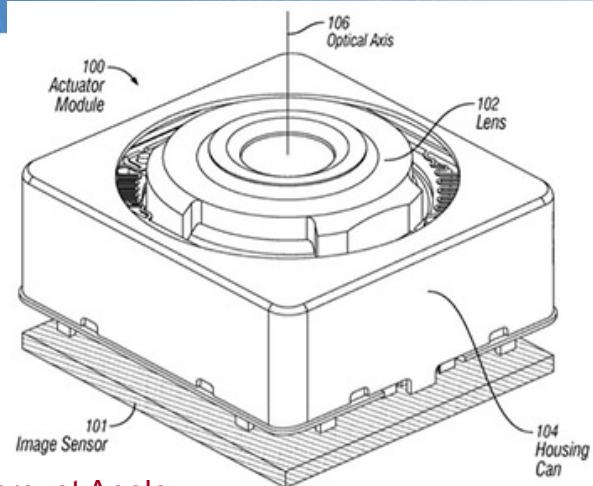
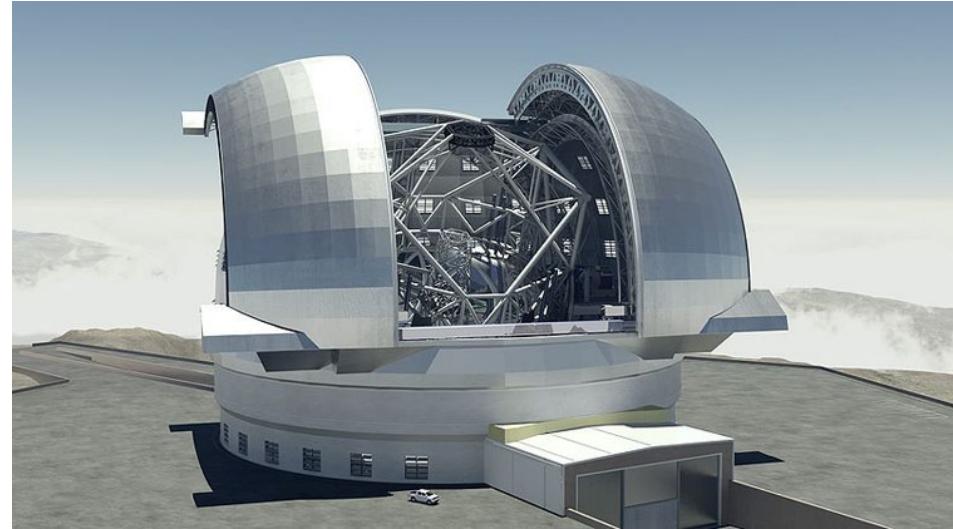
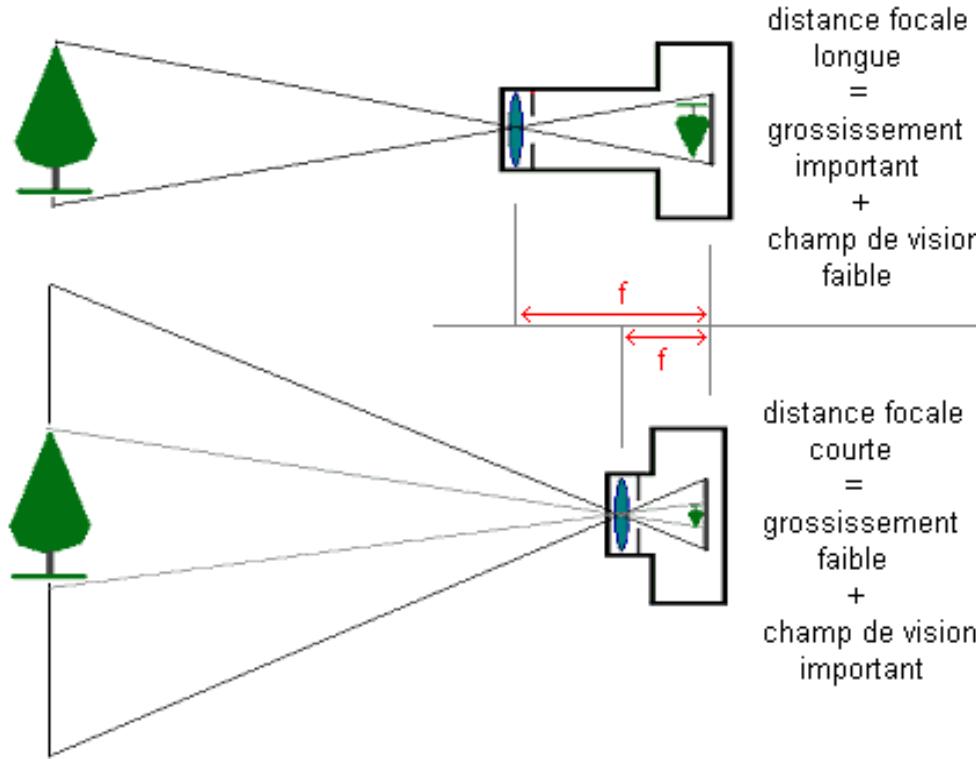


Schéma d'un brevet Apple

# Distance focale, champ et grossissement



- En pratique avec un détecteur fixé : compromis champ / résolution (résolution  $\sim$ = nb de pts de mesure sur l'objet)

# Imagerie à longue focale

- Petit champ et résolution élevée
  - Exemple: Imagerie satellitaire ou aérienne



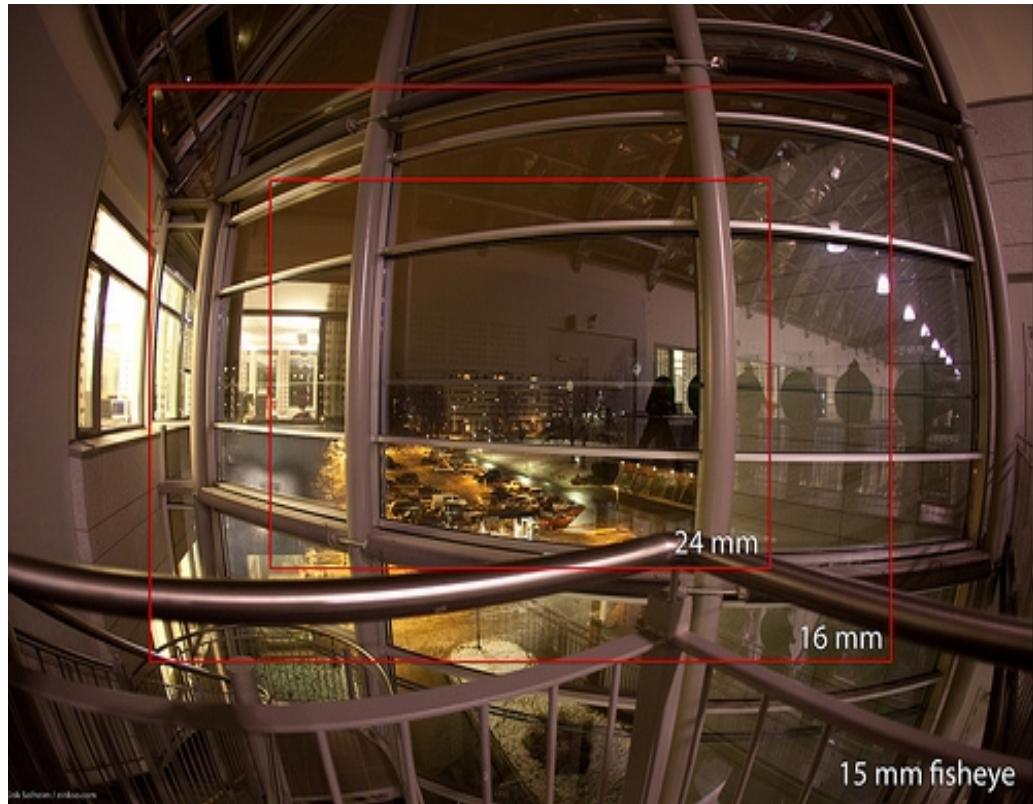
Image Google 1 pixel  $\approx$  70 cm au sol

- Exemple : photo de sport au zoom



# Imagerie à courte focale

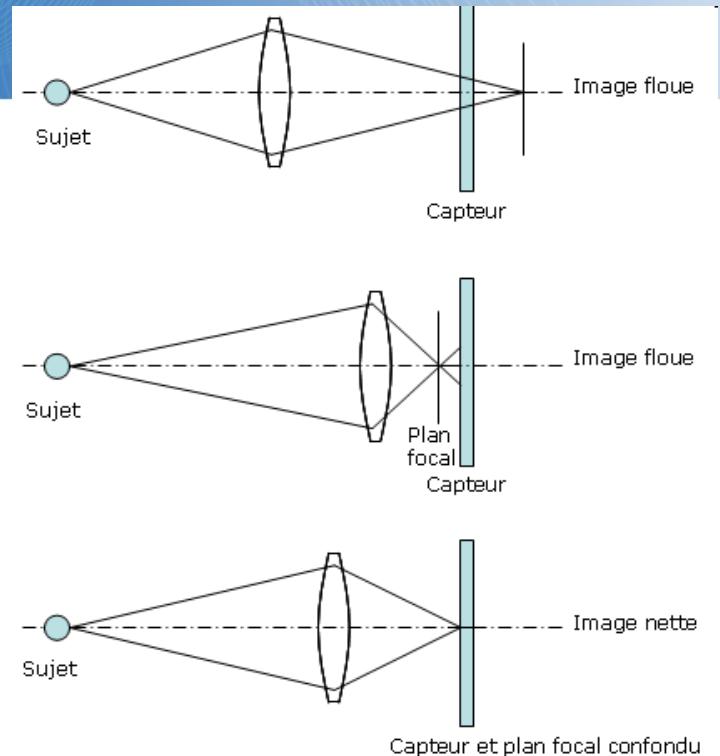
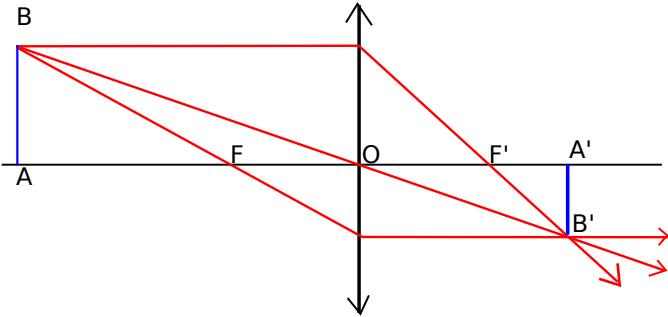
- Grand champ et résolution faible
  - Et des distorsions géométriques...



Semi-Dense SLAM with omnidirectionnal camera  
D. Caruso et al. IROS, 2015

# Mise au point

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$$

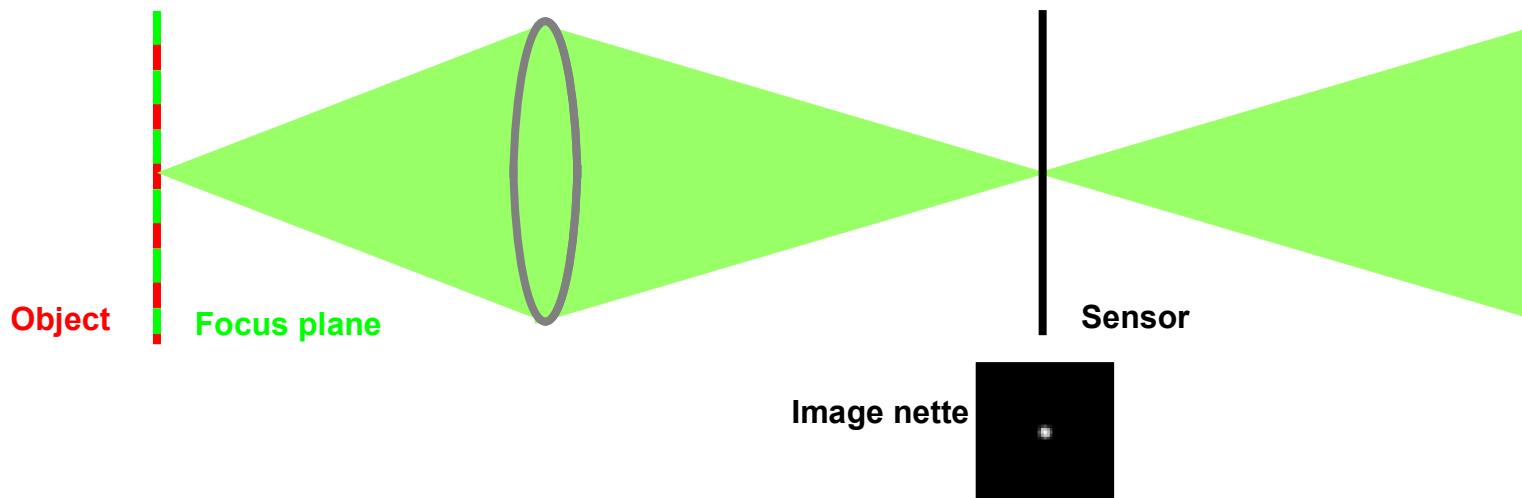


- Mise au point = positionner le plan de netteté sur l'objet d'intérêt
- Appareils photographiques : autofocus
  - Par exemple par mesure du contraste local
- Pour la mesure, on conserve en général une mise au point manuelle

# Flou de défocalisation

- Le flou local est lié à la profondeur

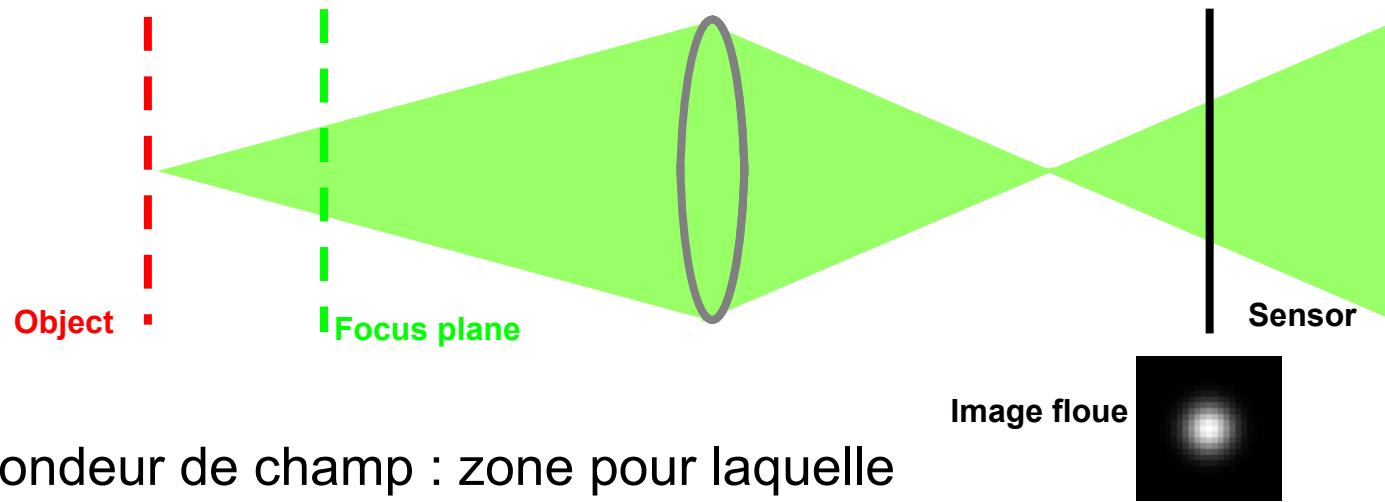
the distance from the sensor to the lens barrel. If you move the sensor closer to the lens, the depth of field will increase to infinity. For example, if your camera has a hyperfocal distance of 18 feet, the focus at 18 feet,



# Flou de défocalisation

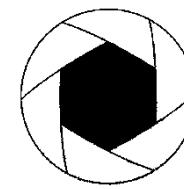
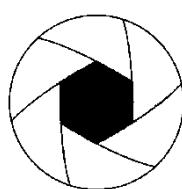
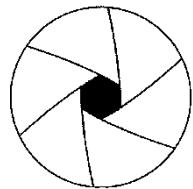
- Le flou local est lié à la profondeur

The depth of field will increase to infinity.<sup>4</sup> For example, a camera has a hyperfocal distance of 18 feet,



- Profondeur de champ : zone pour laquelle la défocalisation est inférieure à la taille du pixel

# Profondeur de champ et ouverture



- Diaphragme fermé  $\Rightarrow$  large profondeur de champ
  - Mais moins de lumière, donc RSB plus faible



Focale 50mm, Ouverture f/6.4



Focale 50mm, Ouverture f/4

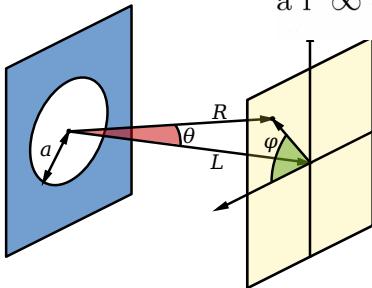


Focale 50mm, Ouverture f/1.8

Image : <http://www.emmanuelgeorjon.com/profondeur-de-champ-14/>

# Une image "bien nette"...

...est quand même limitée en résolution spatiale

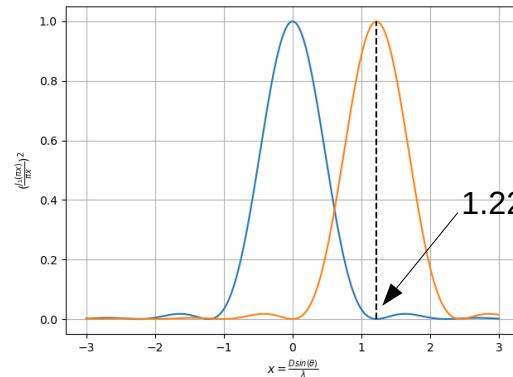


$$\text{à l'} \infty : I(\theta) = I_0 \left( 2 \frac{J_1(k a \sin(\theta))}{k a \sin(\theta)} \right)^2$$

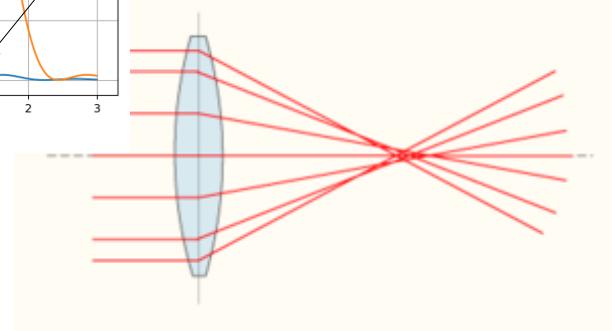
$$D = 2a$$

Diffraction à l'infini sans lentille  
(crédit Wikipédia)

$$1^{ier} zéro : \sin(\theta) = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (k = \frac{2\pi}{\lambda})$$

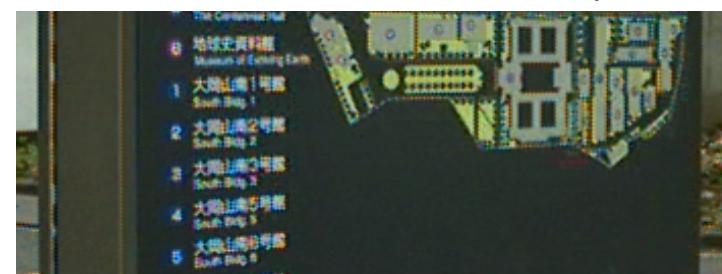


Tache d'Airy



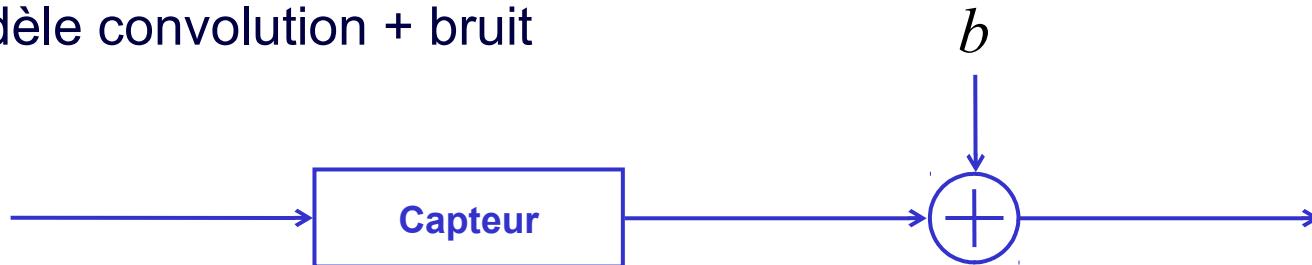
Aberrations chromatiques

- Limite de diffraction (Tache d'Airy)
  - Critère de Rayleigh :  $1.22 \lambda / D$
  - D est l'ouverture du système optique
- Aberrations optiques
  - Aberration sphérique, astigmatisme, coma
  - Aberrations chromatiques
- Intégration détecteur



# Résolution spatiale limitée : un modèle très utile

- Modèle convolution + bruit



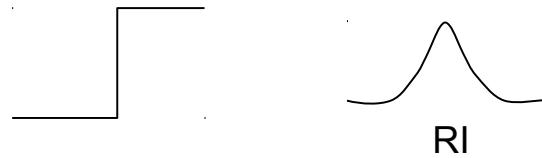
$x$

$h$

$h * x$

$z = h * x + b$

1D



2D



# Modèles de FEP et image

FEP (PSF)

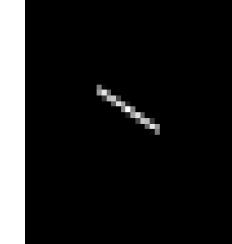
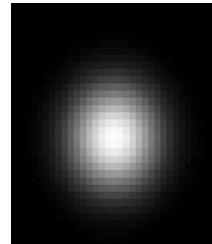
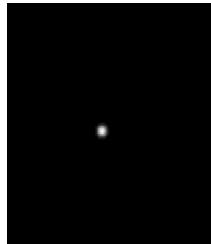


Image nette

Flou gaussien

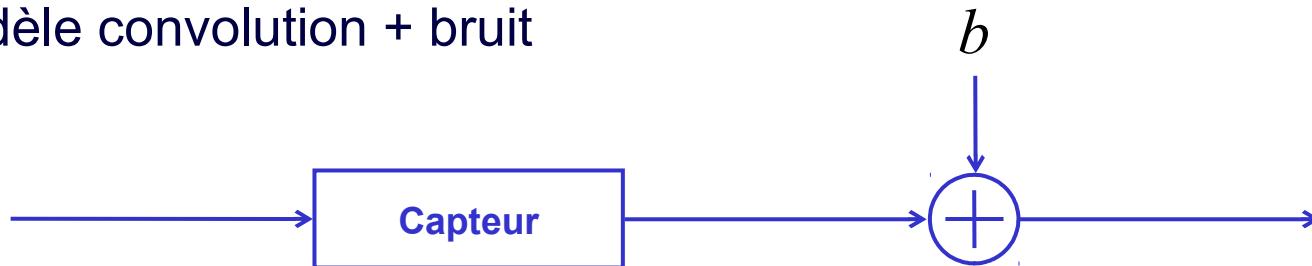
Flou de bougé

# Plan du cours 1

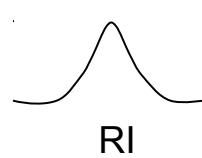
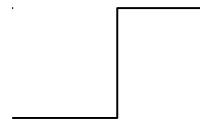
- Schéma de principe d'un capteur imageur numérique
- Système optique
  - **Intermède : déconvolution**
- Détecteur
  - Intermède : débruitage
- Étalonnage géométrique

# Comment "déconvoluer" z pour retrouver x ?

- Modèle convolution + bruit

 $x$  $h$  $h * x$ 

$$z = h * x + b$$

**1D****2D**

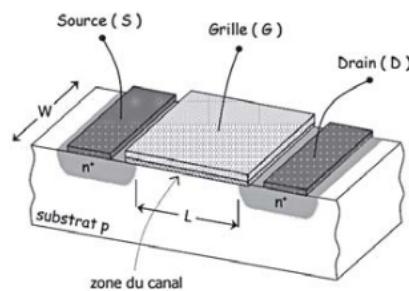
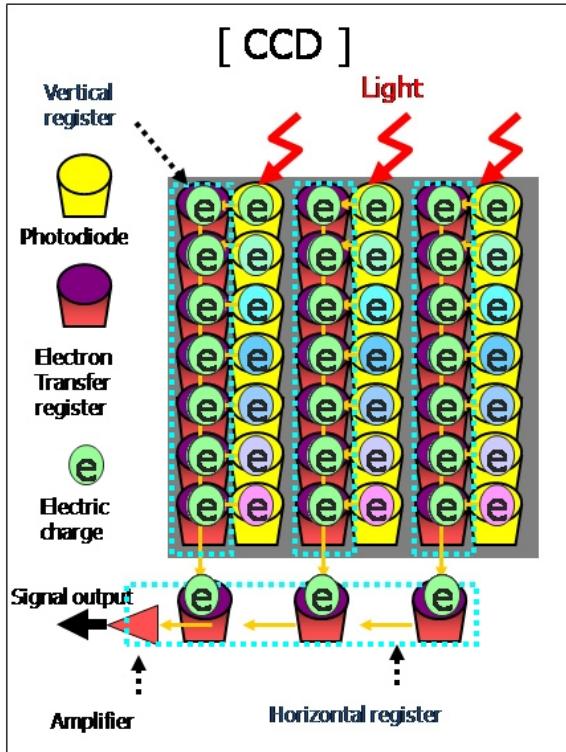
# Plan du cours 1

- Schéma de principe d'un capteur imageur numérique
- Système optique
  - Intermède : déconvolution
- **Détecteur**
  - Intermède : débruitage
- Étalonnage géométrique

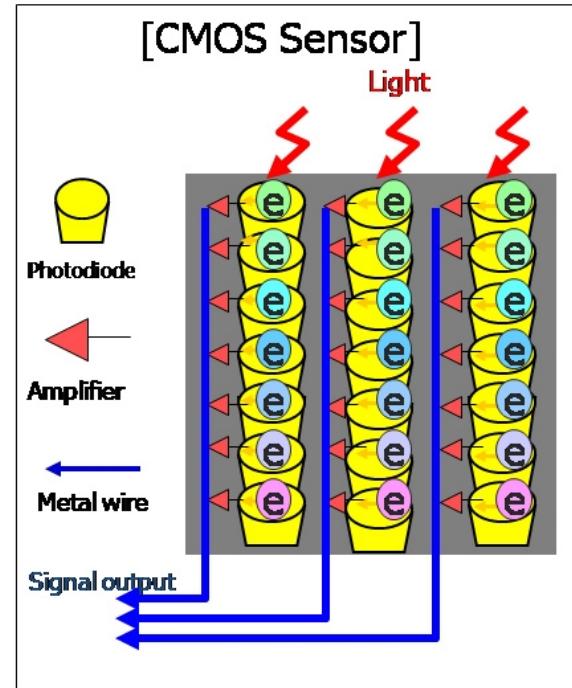
# Détecteur



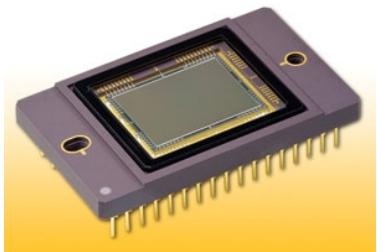
# CCD vs. CMOS



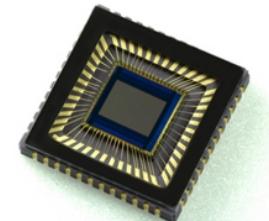
Capacité MOS



Charge-coupled device

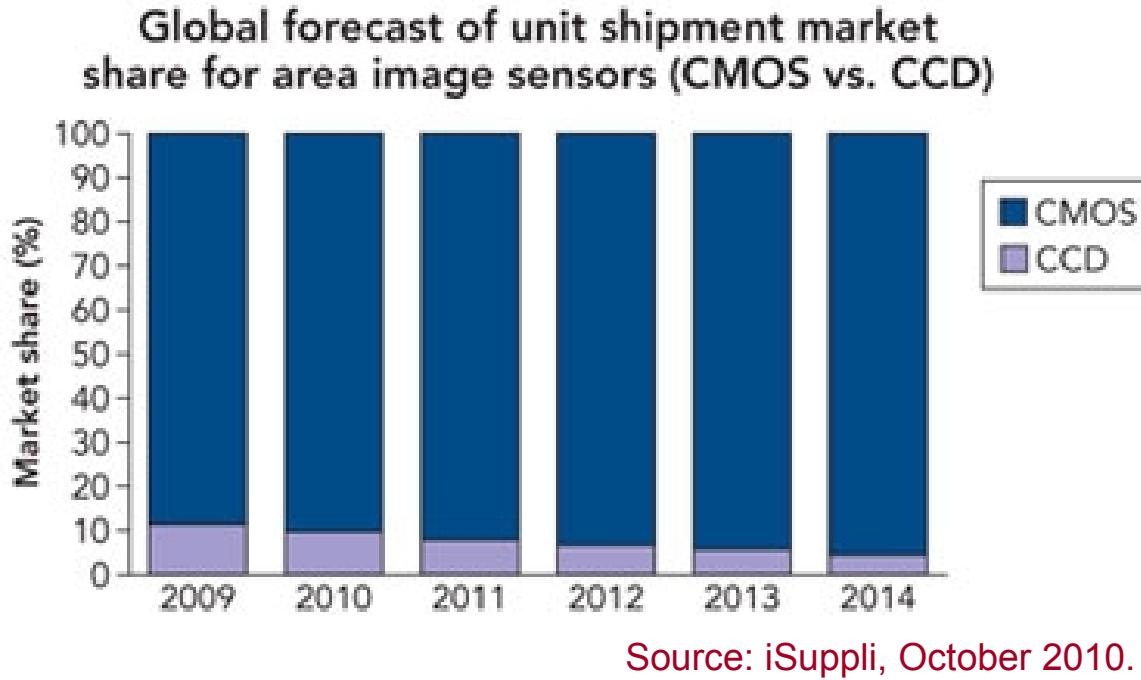


Complementary  
Metal/Oxyde/Semiconductor



<http://www.digitalbolex.com/global-shutter/>

# And the winner is...

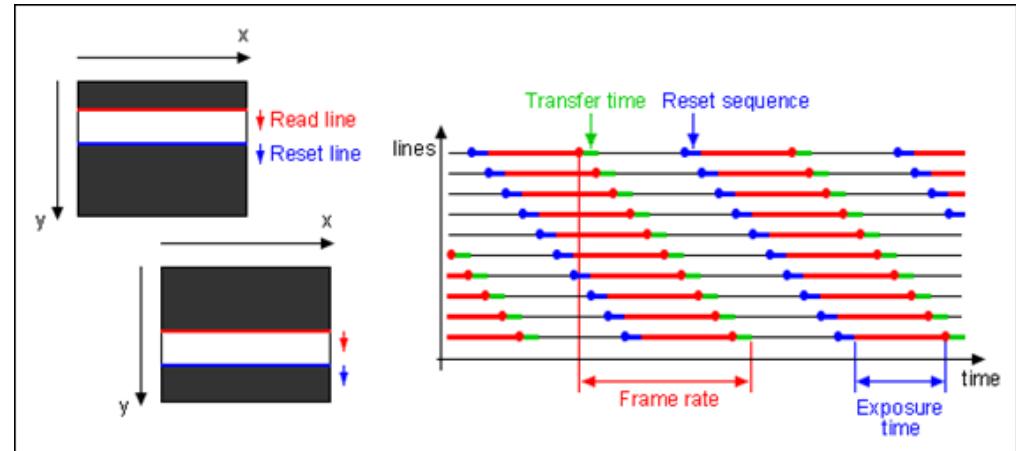


...CMOS !

- Surtout une question de coût de fabrication
- Bientôt : CCD uniquement utilisés pour certaines applications professionnelles très exigeantes(astronomie)

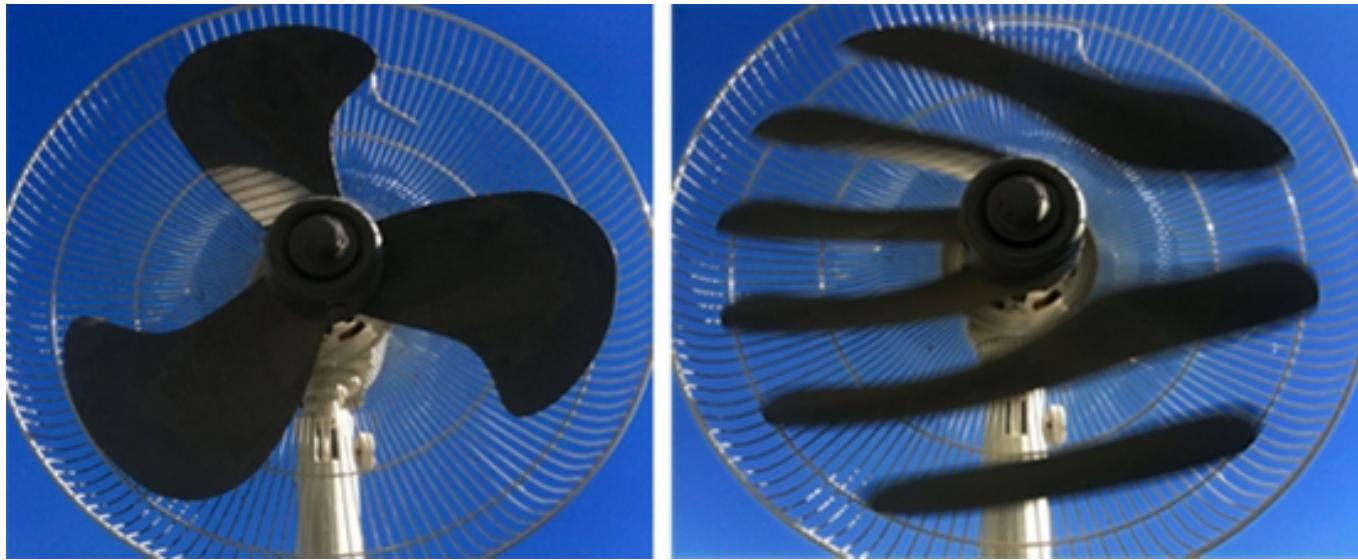
# Global shutter et rolling shutter

- Global shutter : tous les pixels sont lus en même temps
  - A l'origine : CCD
- Rolling shutter : chaque ligne est lue avec un décalage temporel par rapport à la précédente
  - Cadence plus élevée avec le même temps d'intégration
  - Artefacts sur scène dynamiques
  - A l'origine : CMOS



- Aujourd'hui
  - CMOS "bas-coût" en RS
  - CMOS/CCD chers : en GS

# Artefacts rolling shutter

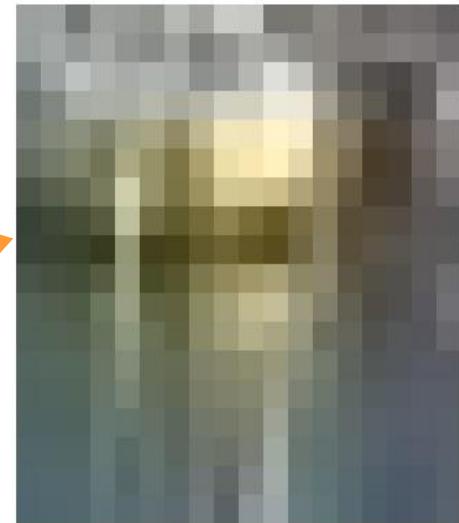


<http://www.digitalbolex.com/global-shutter/>

# Échantillonnage

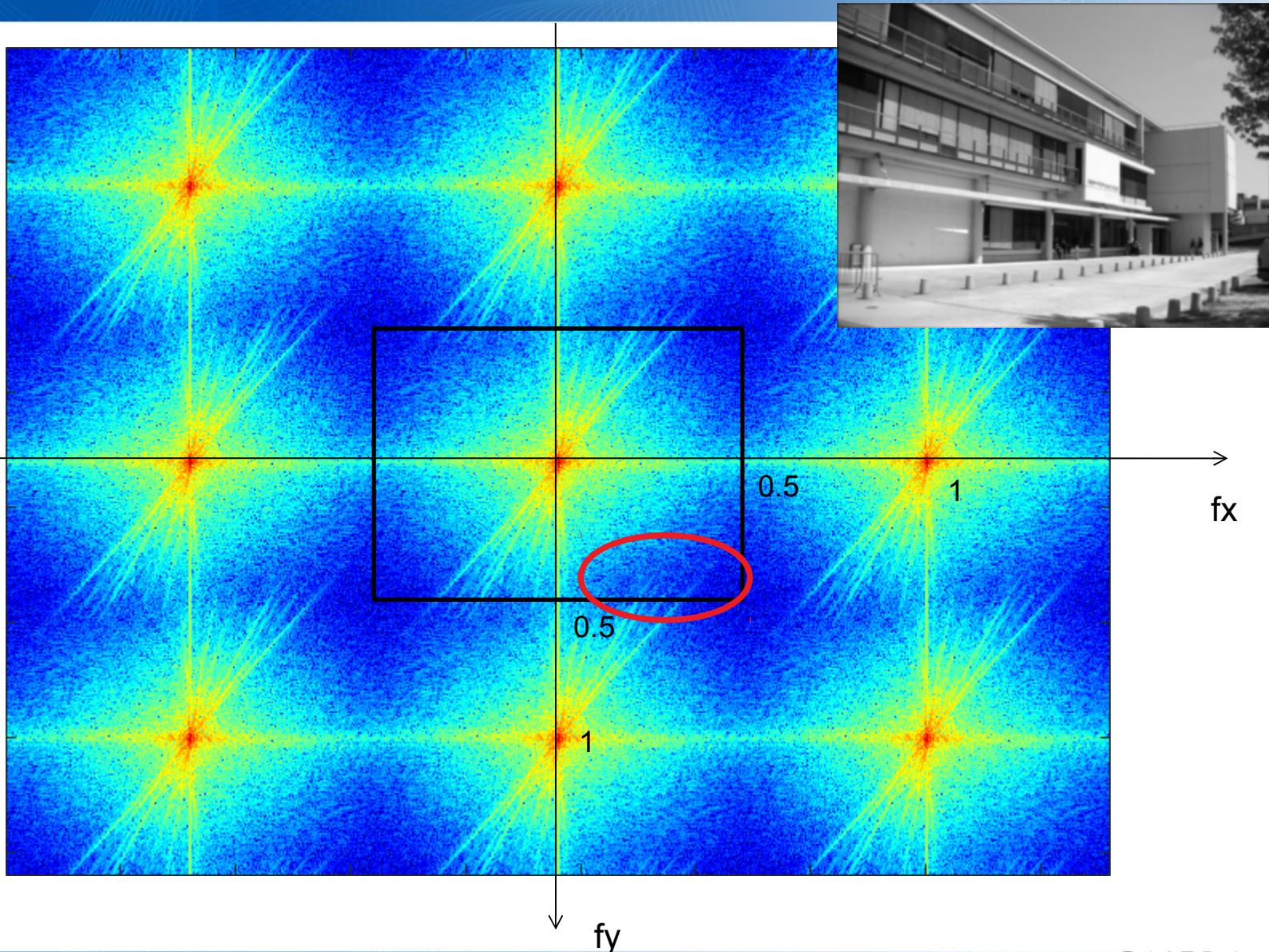
- Grille de détecteurs

$$z(k,l) = [h * x](k,l) + b(k,l)$$



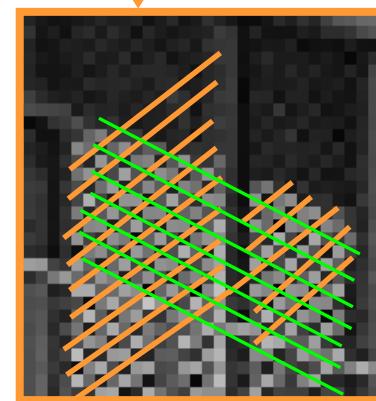
**Zoom d'une zone de  
18x18 pixels**

# Échantillonnage et repliement (1/3)



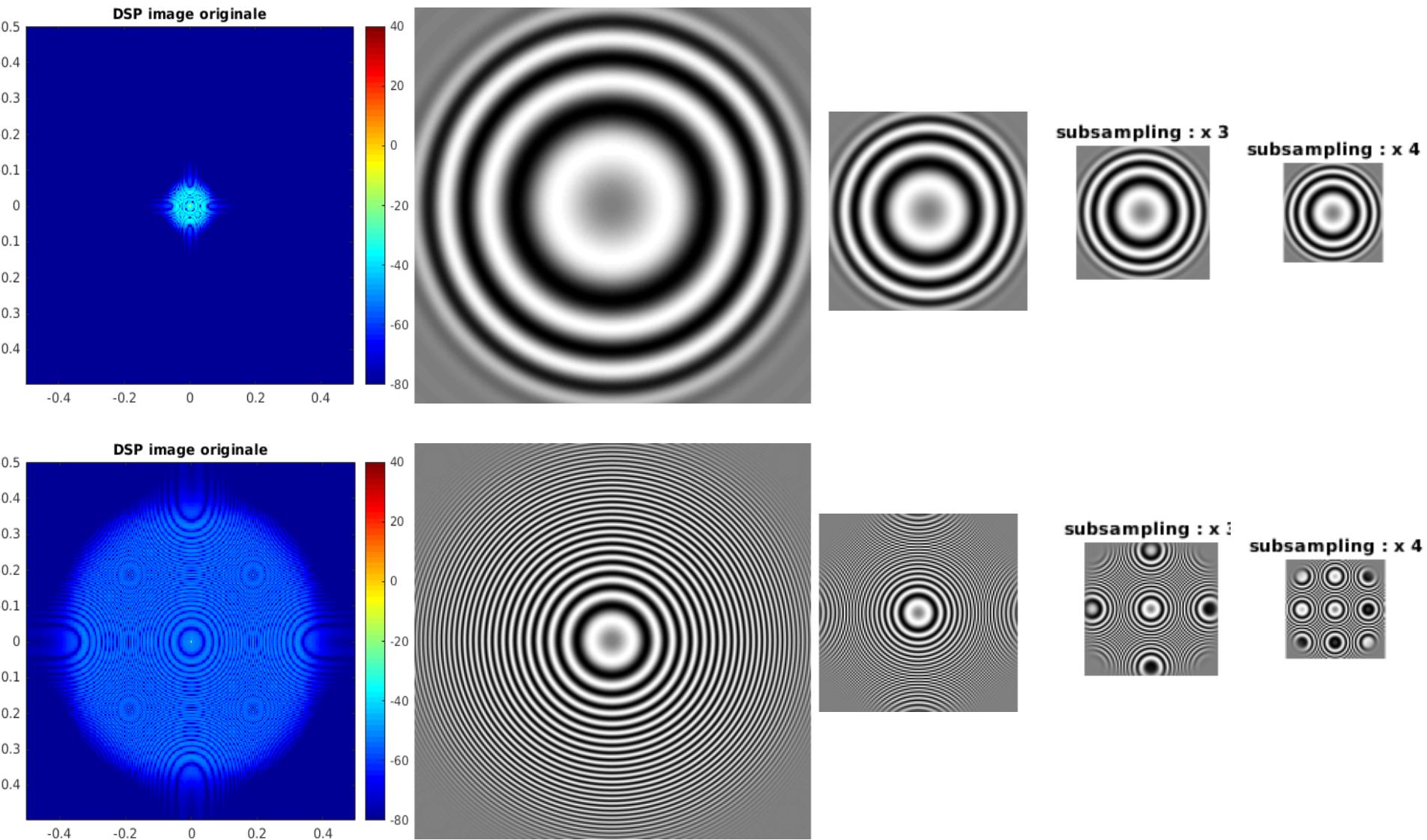
# Échantillonnage et repletement (2/3)

- En 2D : repletement ou aliasing
  - Modifie les fréquences 2D des motifs HF de l'image



Les stores ≈ horizontaux  
ne le sont plus du tout !

# Échantillonnage et repleinement (2/3)



# Le repliement est (presque) inévitable en image

- Images aériennes simulées
  - L'image qui respecte le théorème de Shannon paraît de moins bonne qualité



Image à Shannon



Image repliée

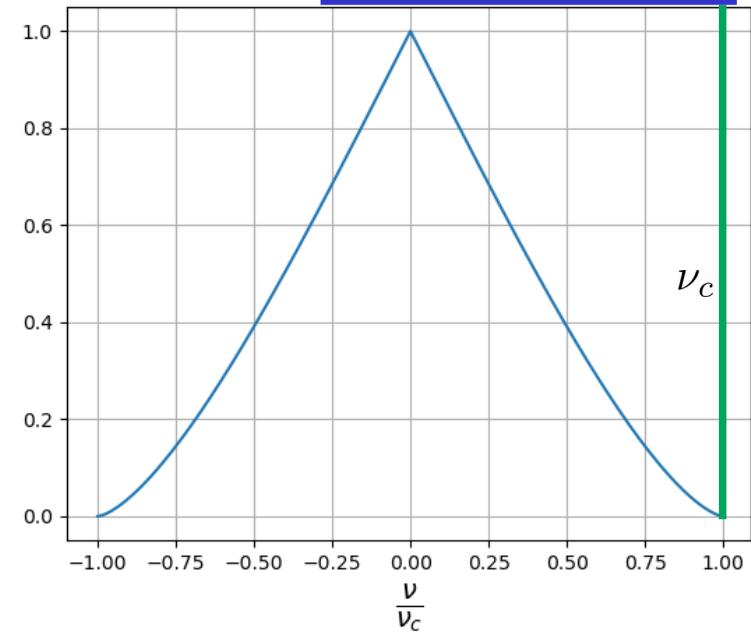
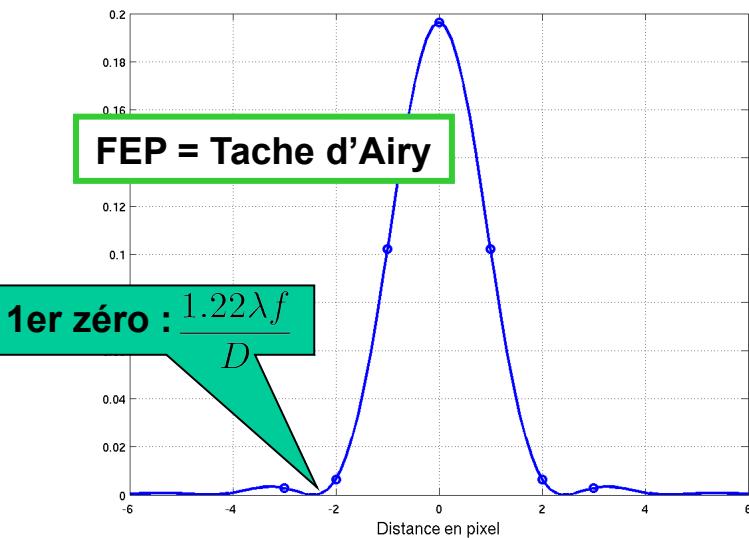
# Origine du sous-échantillonnage

- Système limité par la diffraction
  - fonction de transfert optique

$$\nu_c : \text{Fréquence de coupure optique} : \quad \nu_c = \frac{1}{\lambda N} = \frac{D}{\lambda f}$$

$$\nu_e : \text{Fréquence d'échantillonnage spatiale} = \frac{1}{t_{pix}}$$

$$\nu_n : \text{Fréquence de Nyquist} = \frac{1}{2t_{pix}}$$



Si on prend:  $\nu_e = 2\nu_c \Leftrightarrow \nu_n = \nu_c$

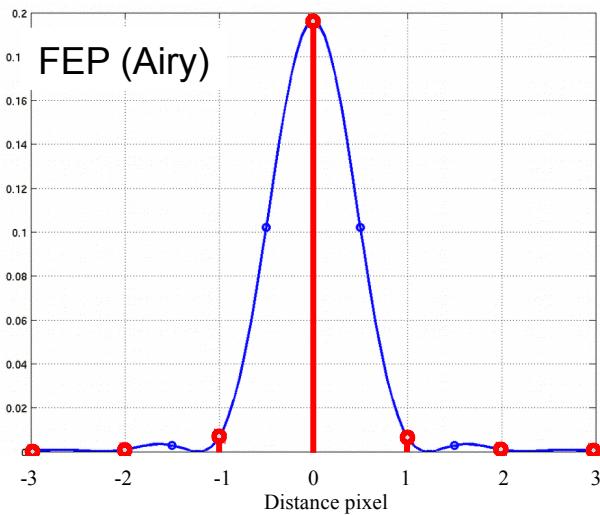
$$\frac{\nu_c}{\nu_n} = \frac{2t_{pix}D}{\lambda f} = 1 \Rightarrow \frac{1.22\lambda f}{D} = 2.44t_{pix}$$

- Image bien échantillonnée mais floue car la tache d'Airy n'est pas dans le pixel

# Origine du sous-échantillonnage

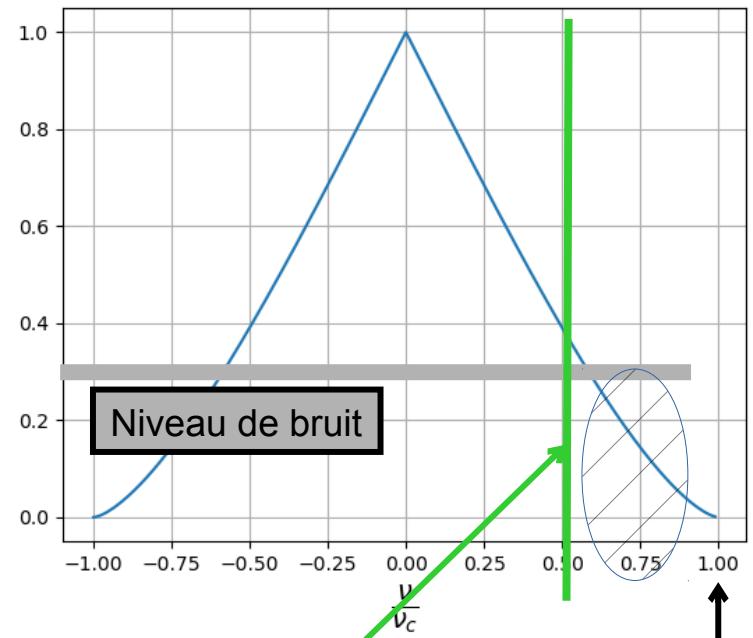
Module de la FTO  
(ouverture circulaire)

- Système limité par la diffraction
  - fonction de transfert optique



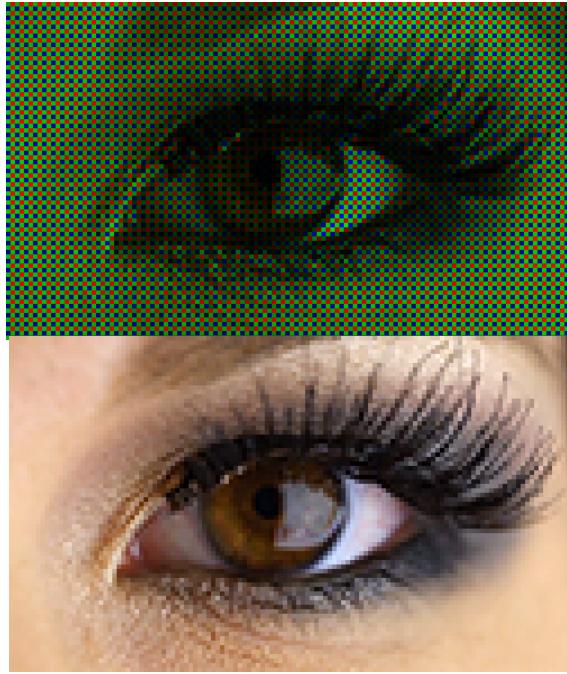
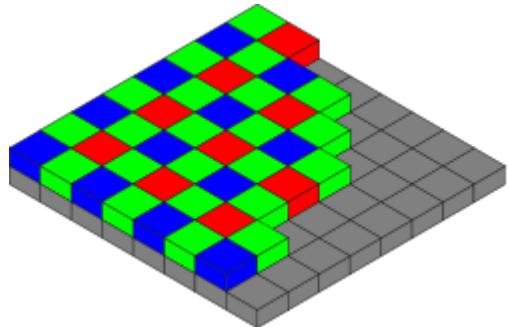
$$\frac{1.22\lambda f}{D} = 1.22 t_{pix} \Rightarrow \frac{\nu_c}{\nu_n} = 2$$

- Conception optique : compromis
  - implique en général un **sous-échantillonnage** relativement à Shannon-Nyquist



# Capteur couleur

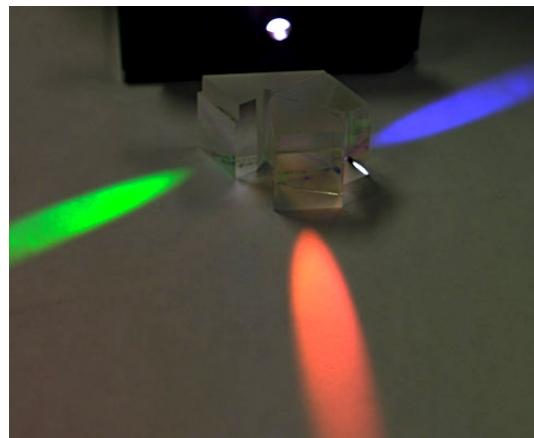
Multiplexage spatial  
Schéma Bayer



[www.red.com](http://www.red.com)

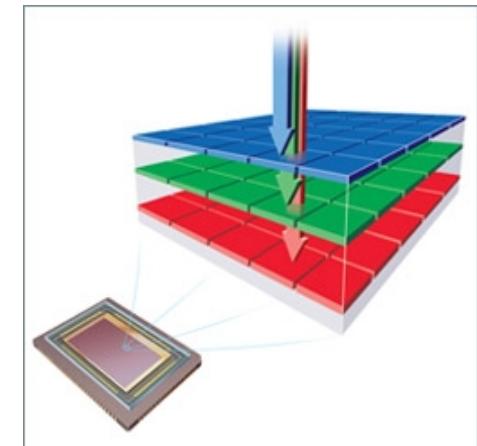


TriCCD sony



Dick Lyon wikipedia

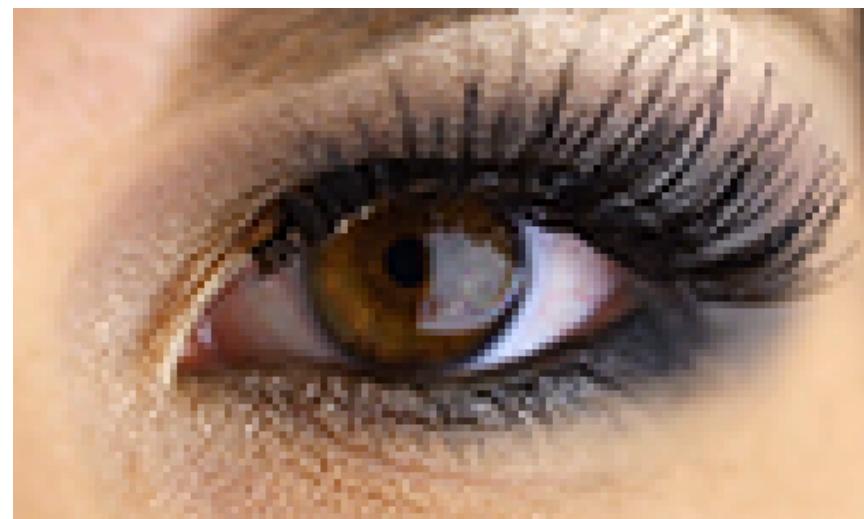
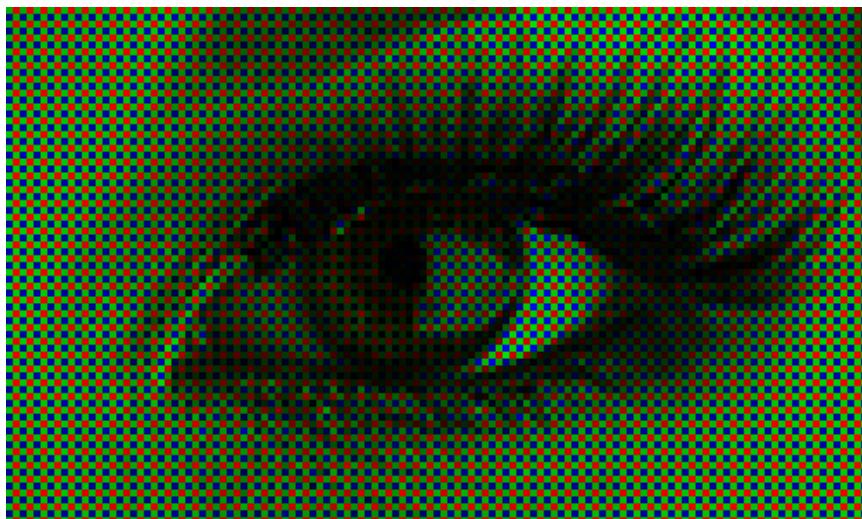
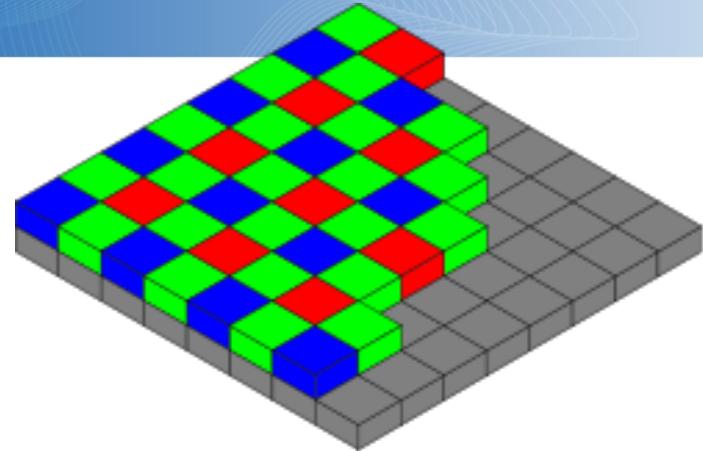
Capteur Foveon X3  
[Foveon.com](http://Foveon.com)



DLSR Sigma SD9  
ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

# Capteur couleur à schéma Bayer

- Encore plus de repliement !
- Interpolation des pixels de couleur manquant
  - Dématriçage
  - Demosaicking
- Cf.  
Cours Frédo Durand et al. (MIT)  
<http://stellar.mit.edu/S/course/6/sp15/6.815/materials.html>



# Bruit



# Bruit



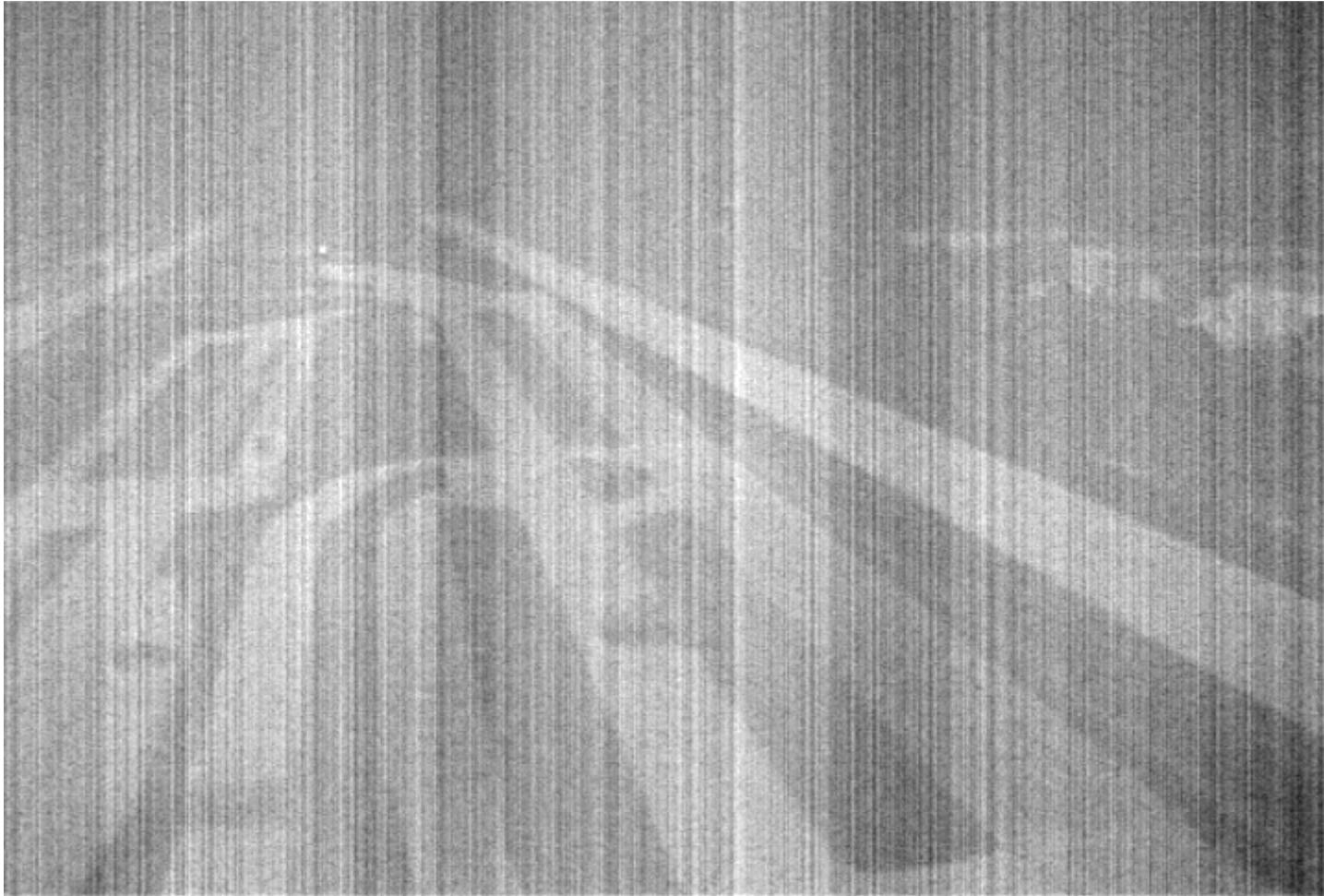
- Visible surtout en illumination faible
- Fluctuations non désirées
  - spatiales
  - temporelles
- Caractérisation statistique
  - Variance



Cours Frédo Durand et al. (MIT)  
<http://stellar.mit.edu/S/course/6/sp15/6.815/materials.html>

# Bruit spatial fixe

- Défaut d'égalisation des gains inter-capteur (surtout en IR)
  - Motif haute fréquence en colonne fixe



# Plan du cours 1

- Schéma de principe d'un capteur imageur numérique
- Système optique
  - Intermède : déconvolution
- Détecteur
  - **Intermède : débruitage**
- Étalonnage géométrique

# Comment réduire l'effet du bruit ?

Image bruitée



filtrage gaussien



filtre bilatéral



filtre YUV bilatéral



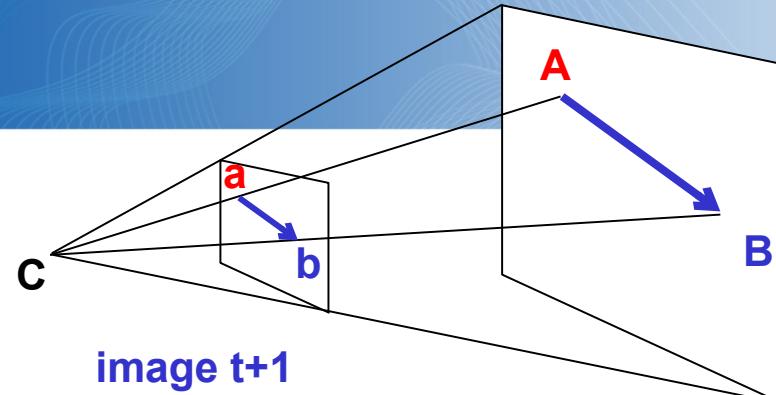
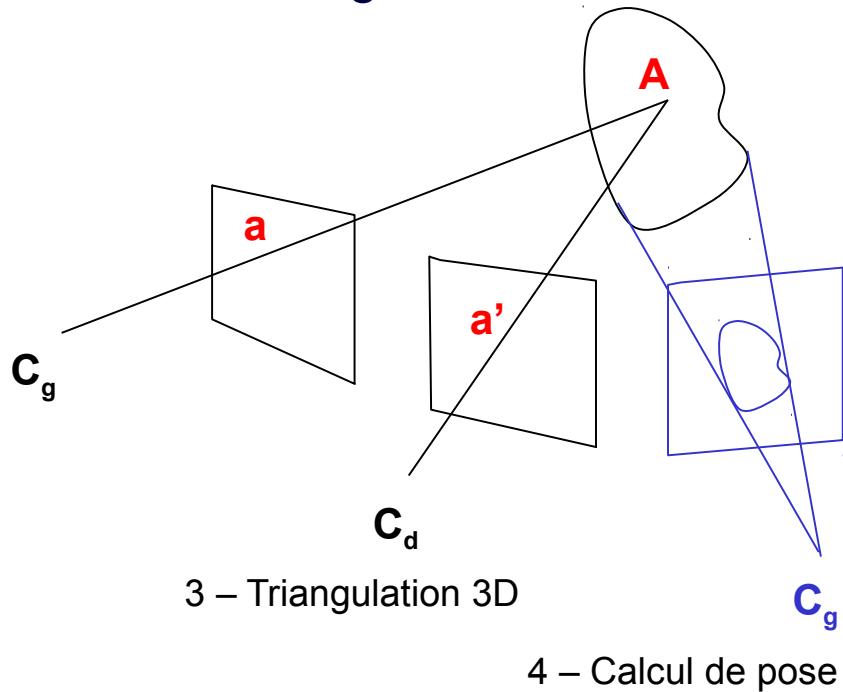
Exemple issu du cours Frédo Durand et al. (MIT)  
<http://stellar.mit.edu/S/course/6/sp15/6.815/materials.html>

# Plan du cours 1

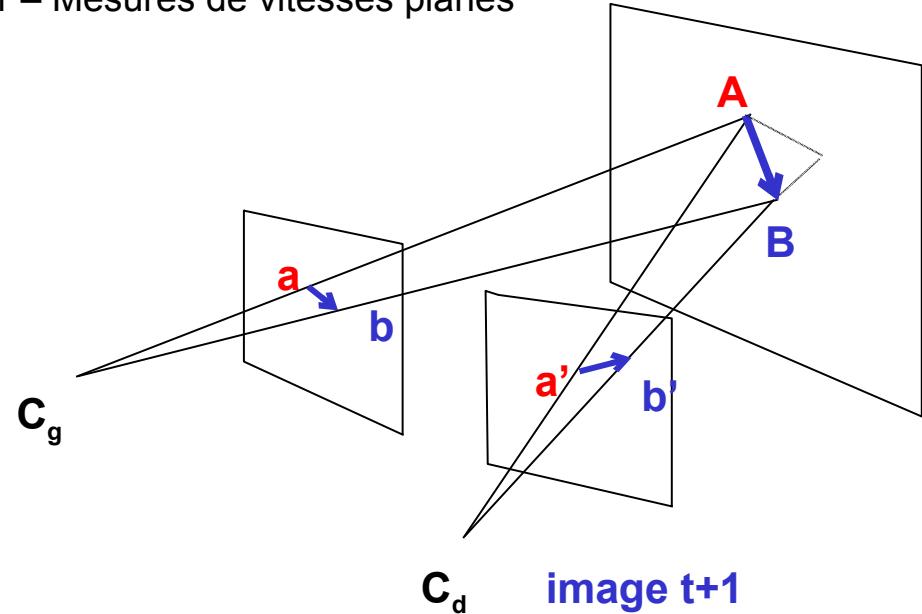
- Schéma de principe d'un capteur imageur numérique
- Système optique
  - Intermède : déconvolution
- Détecteur
  - Intermède : débruitage
- **Étalonnage géométrique**

# Photogrammétrie

- Principes de mesures géométriques à partir d'images

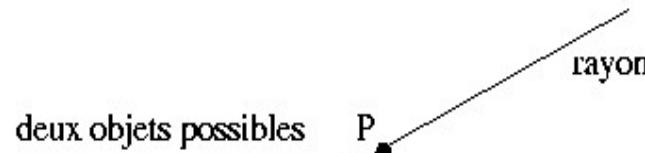


1 – Mesures de vitesses planes



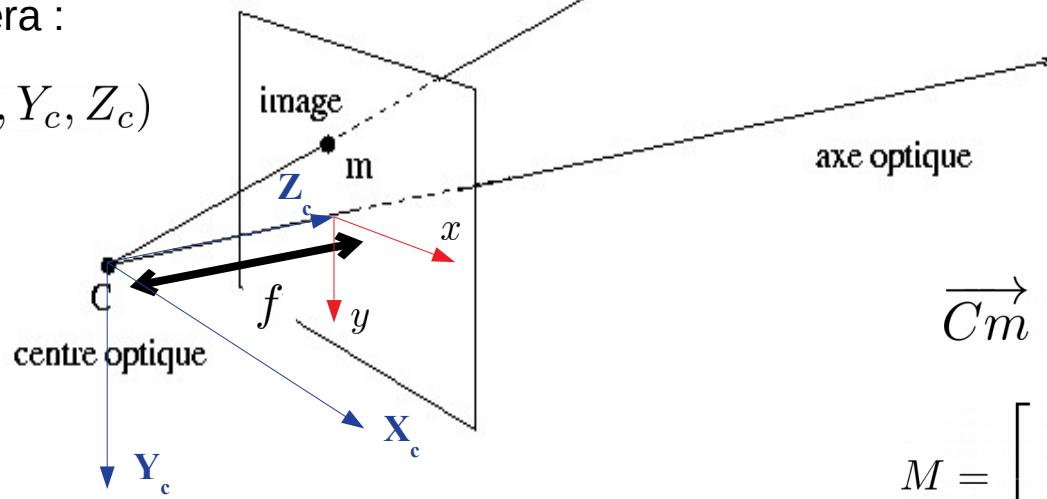
2 – Mesures de vitesses 3C

# Modèle géométrique de la prise d'image



Repère caméra :

$$\mathcal{R}_c = (C, X_c, Y_c, Z_c)$$



$$\overrightarrow{Cm} = \lambda \overrightarrow{CM} = \eta \overrightarrow{CP}$$

$$M = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}_{/\mathcal{R}_c} \quad m = \begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix}_{/\mathcal{R}_c}$$

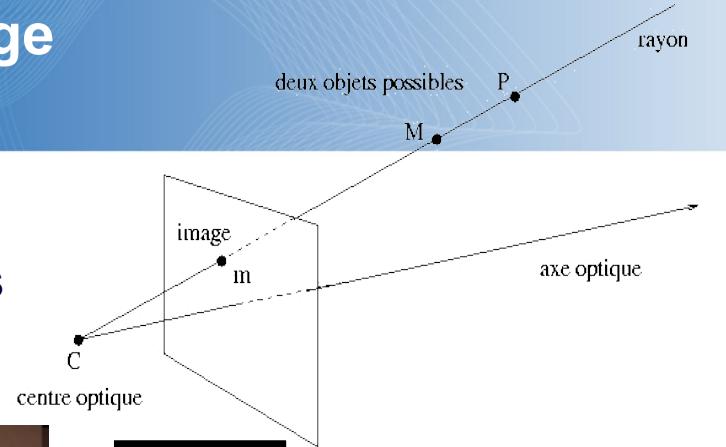
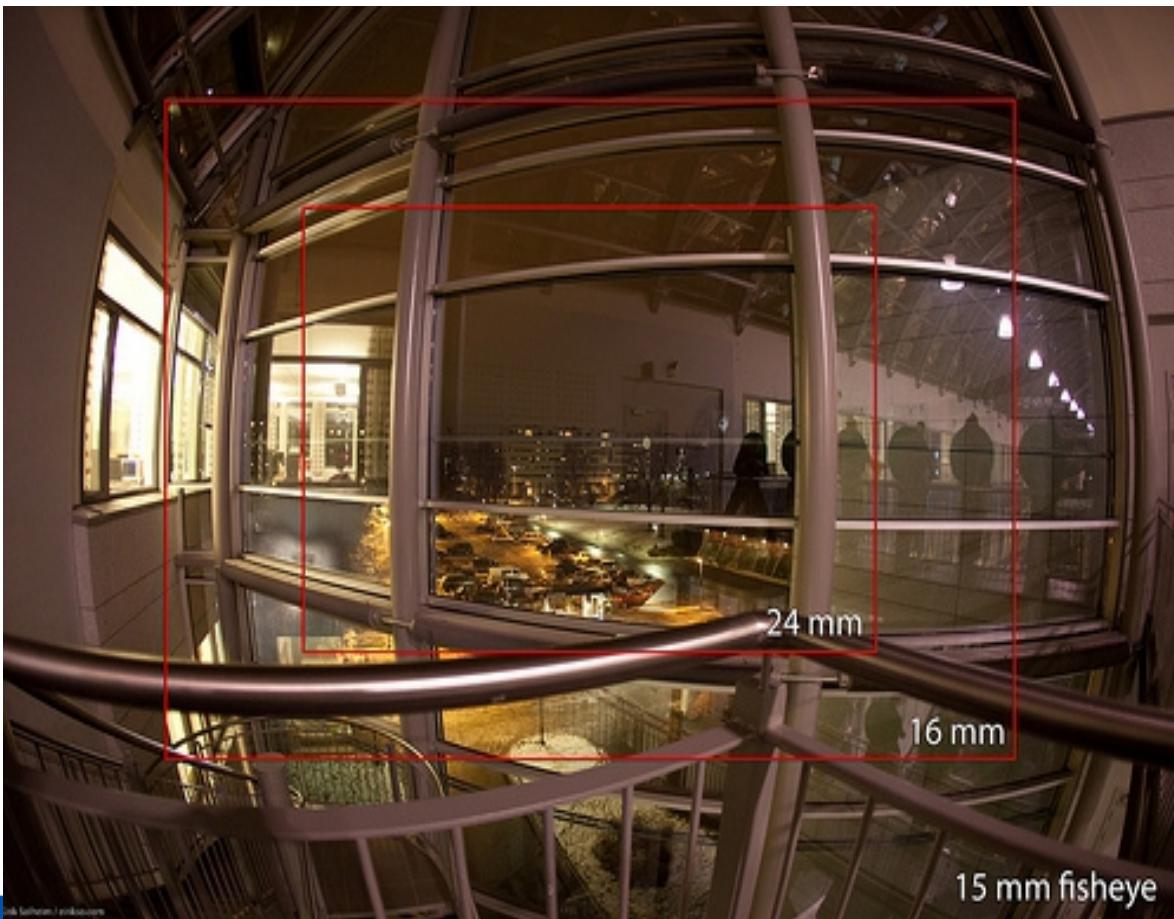
- Modèle sténopé
  - Equation de projection centrale
  - Propriété : conservation des droites

$$\left\{ \begin{array}{l} x = f \frac{X_c}{Z_c} \\ y = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{array} \right.$$

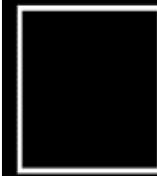
# Modèle géométrique de la prise d'image

- Projection centrale : un modèle idéal
  - Distorsions visibles pour les focales courtes
  -

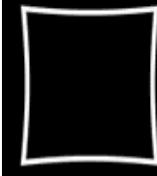
<http://www.flickr.com/people/eirikso/>



distorsion en barillet



pas de distorsion



distorsion en coussin

# Un modèle géométrique plus réaliste

- Déplacement monde → caméra :  $X_c = RX + T$

6

- Projection centrale

$$\begin{cases} x = f \frac{X_c}{Z_c} \\ y = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases}$$

1

- Distorsion En coordonnées normalisée ie :  $f=1$

$$\begin{cases} \tilde{x} = x (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2 (r^2 + x^2) \\ \tilde{y} = y (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + y^2) + 2p_2 xy \\ r^2 = x^2 + y^2 \end{cases}$$

2 à 5

 $k_i$  distorsion radiale $p_i$  distorsion tangentielle

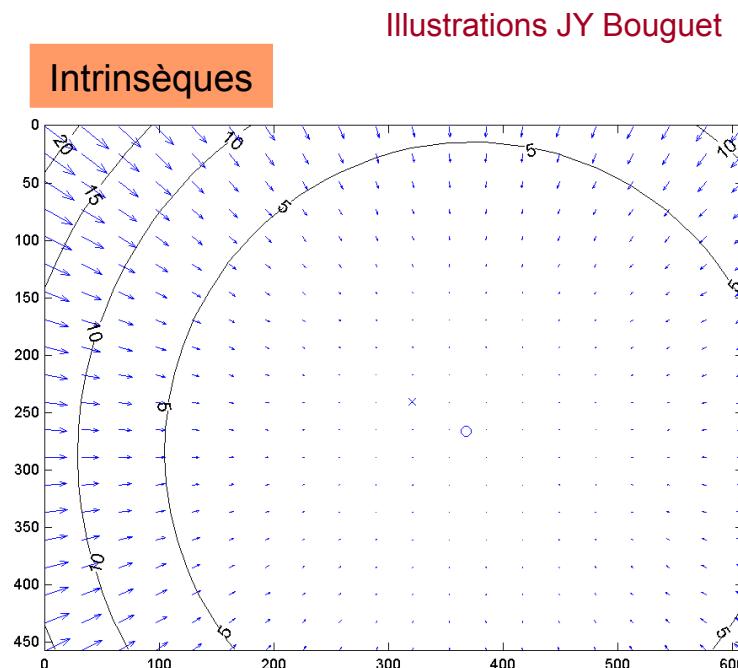
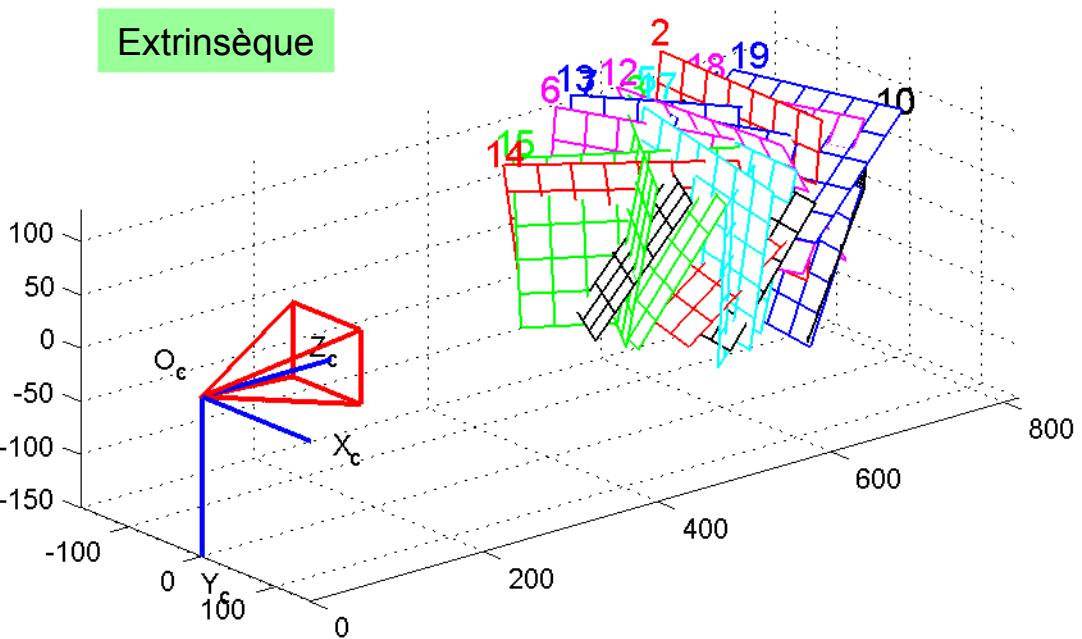
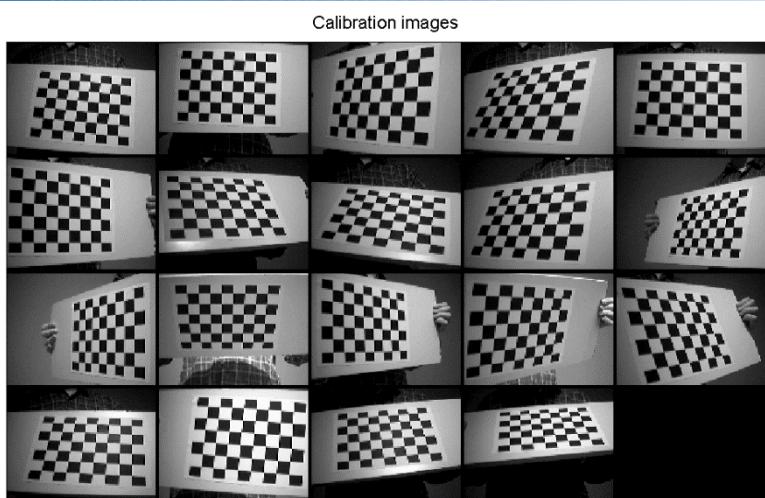
- Numérisation

$$\begin{cases} u = p_u \tilde{x} + u_0 \\ v = p_v \tilde{y} + v_0 \end{cases}$$

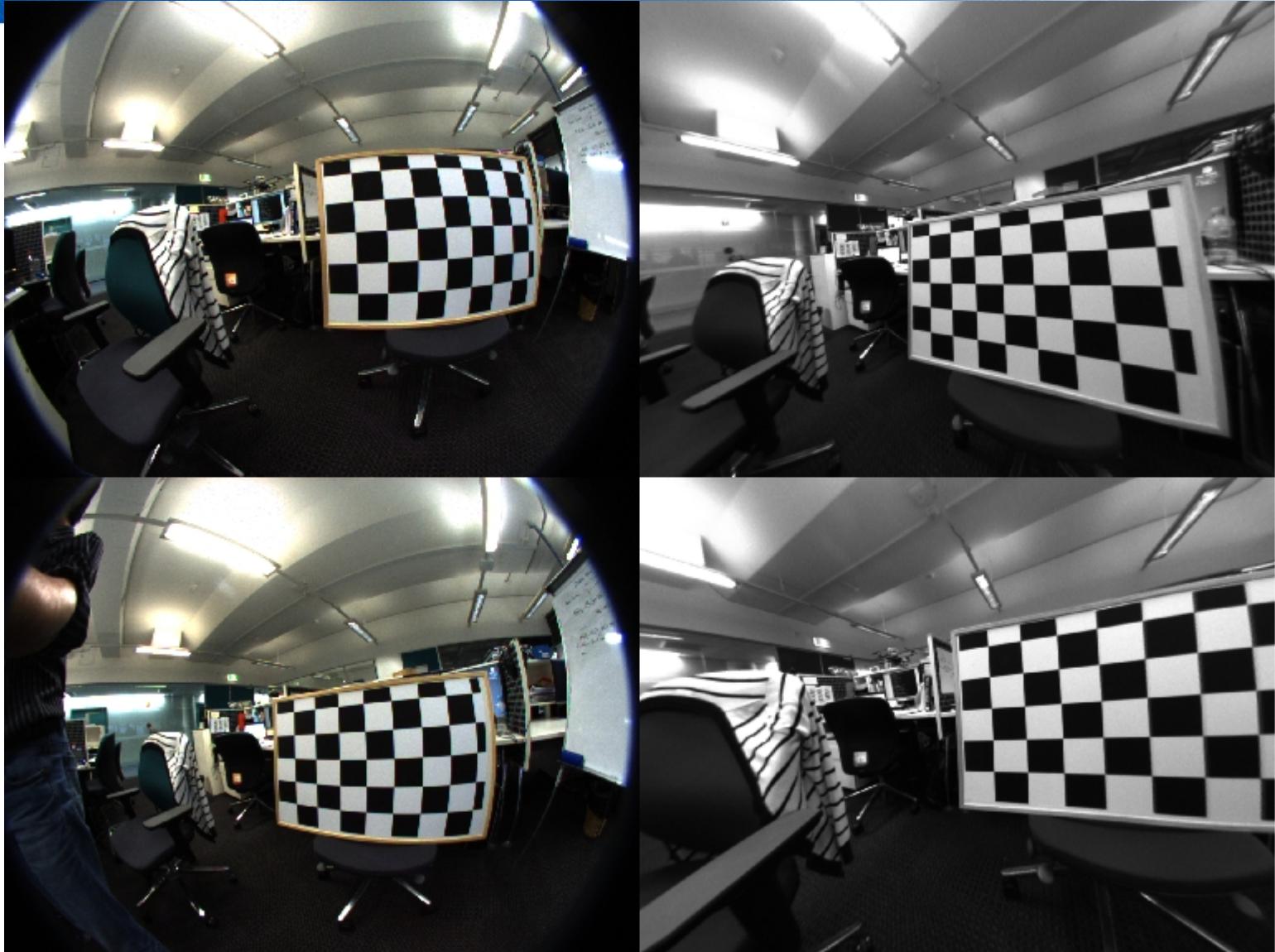
4

# Calibrage géométrique de caméra

- Plusieurs softs sur le web
  - [Matlab Calibration Toolbox J-Y Bouguet]
  - Simples d'emploi
    - Utilisent des images de mire plane



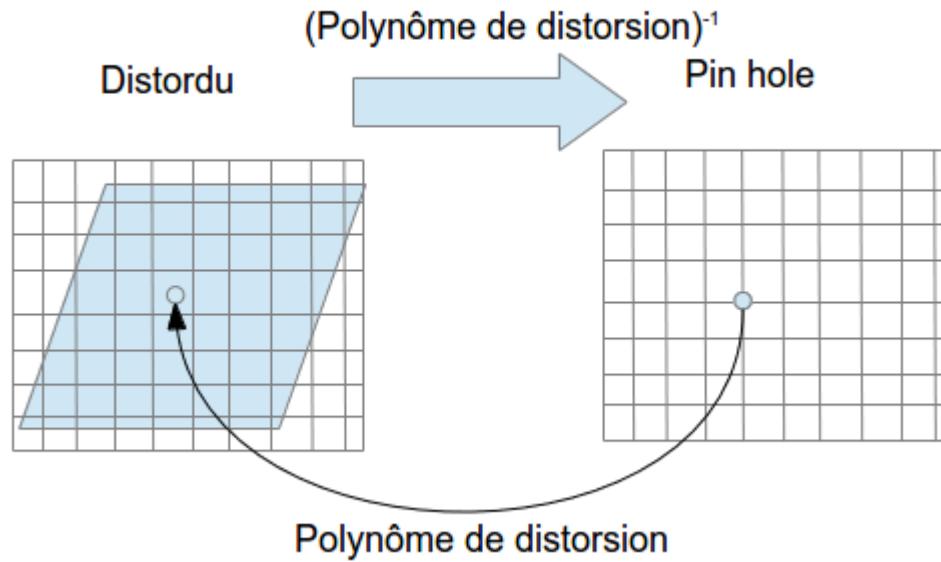
# Dédistorsion des images



Exemple mis en ligne par Hu He, <https://wiki.qut.edu.au/display/cyphy/Camera+Calibration>

# Dédistorsion des images

- Ré-échantillonner l'image sur une grille non distordue ne suppose que le modèle direct (et pas l'inverse!)



$$\begin{aligned}\tilde{x} &= x \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6\right) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + x^2) \\ \tilde{y} &= y \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6\right) + p_1(r^2 + y^2) + 2p_2 xy\end{aligned}$$

$$M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad x = \frac{X}{Z} \quad y = \frac{Y}{Z} \quad \text{ coordonnées normalisées } (f=1)$$
$$r^2 = x^2 + y^2$$

# Conclusion

- Limitations affectant l'observation et la photométrie
  - Flou bruit
    - Traitements associés : déconvolution, débruitage
  - Champ, résolution
    - ⇒ Cours 3 = nouvelles solutions d'association capteur/traitement pour améliorer la qualité image
- Limitations affectant l'estimation géométrique
  - Distorsions géométriques : réglées par étalonnage (calibration)
  - 3D par stéréovision
    - Il faut deux caméras !
    - Limité si peu de textures (ou illumination insuffisante)

⇒ Cours 4 = nouvelles solutions pour la mesure 3D
- Limitations liées à la propagation
  - ⇒ Cours 5/6 = optique adaptative