



## Capteurs imageurs et traitements bas-niveau

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

Guy Le Besnerais, ONERA/DTIM  
[lebesner@onera.fr](mailto:lebesner@onera.fr)

**ONERA**  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

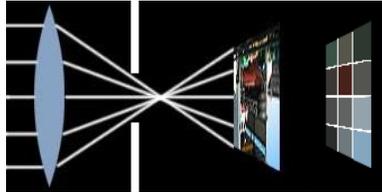
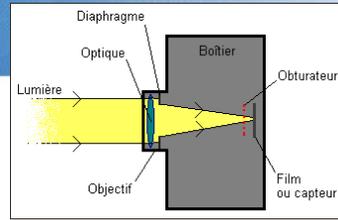
retour sur innovation

### Plan du cours 1

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

## Schéma de principe

- Simple et inchangé depuis l'argentique

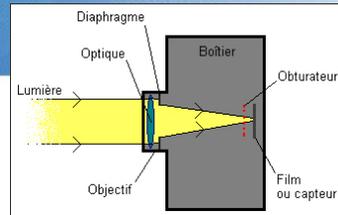


Système optique

Détecteur

## Schéma de principe

- Simple et (quasiment) inchangé depuis l'argentique



Système optique

Détecteur

Calculateur

## Plan du cours 1

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

T5 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## 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)

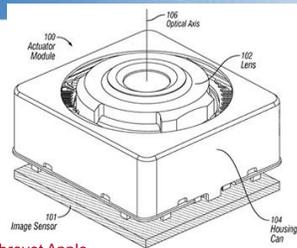


Schéma d'un brevet Apple

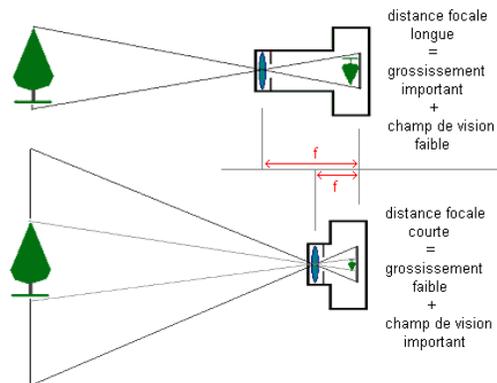


Représentation du futur E-ELT (42m)

T6 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Distance focale, champ et grossissement



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

T7 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Imagerie à longue focale

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



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

- Exemple : photo de sport au zoom

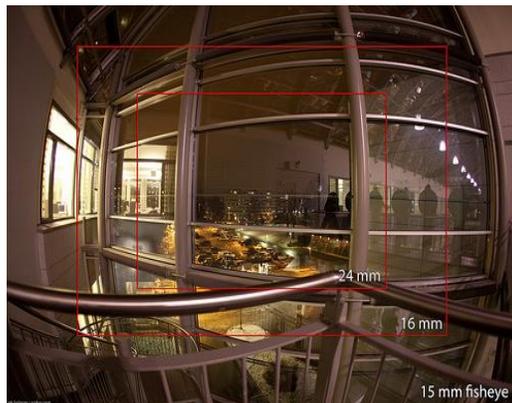


T8 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Imagerie à courte focale

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

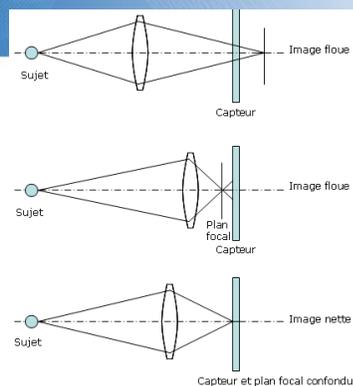


Semi-Dense SLAM with omnidirectional camera  
D. Caruso et al. IROS, 2015

T9 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Mise au point



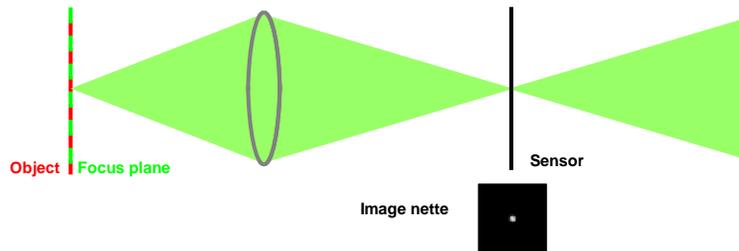
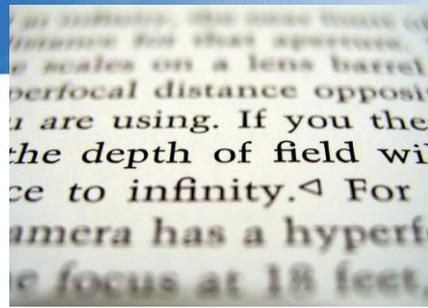
- Mise au point = positionner le plan de netteté sur l'objet d'intérêt
- Appareils photographiques : autofocus
  - Par exemple par mesure du contraste local
- Pour la mesure, on conserve en général une mise au point manuelle

T10 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Flou de défocalisation

- Le flou local est lié à la profondeur

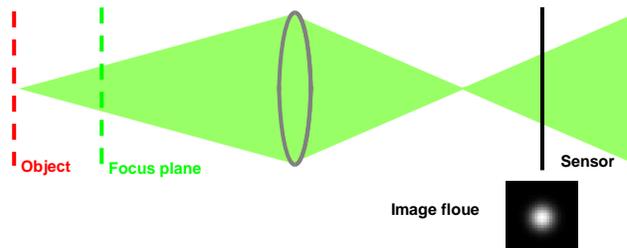
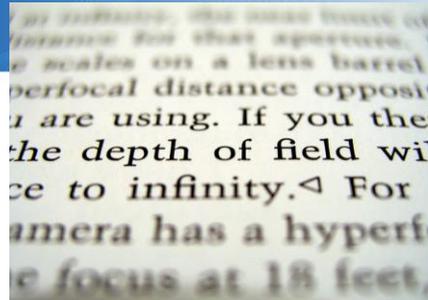


T11 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Flou de défocalisation

- Le flou local est lié à la profondeur



T12 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## 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

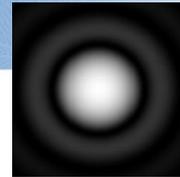
Image : <http://www.emmanuelgeorjon.com/profondeur-de-champ-14/>

T13 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

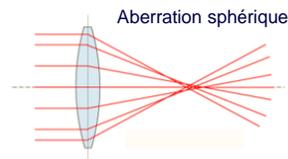
## Une image "bien nette"...

...est quand même limitée en résolution spatiale



Tache d'Airy

- 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



Aberration sphérique

Aberrations chromatiques

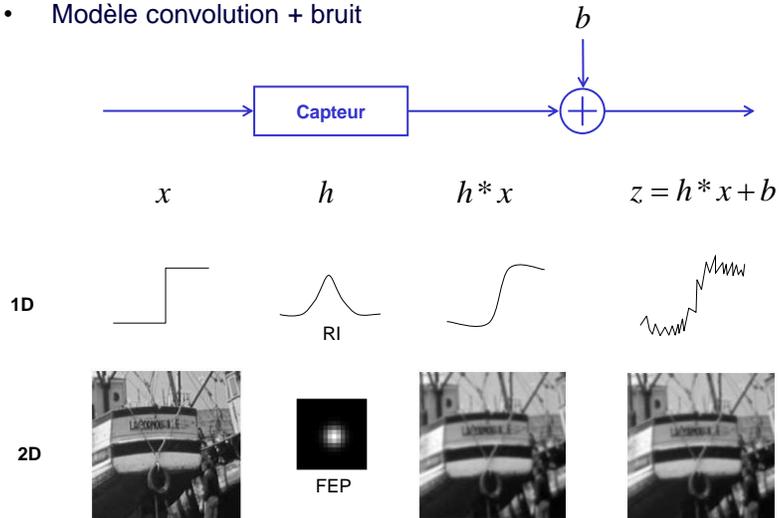


T14 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Résolution spatiale limitée : un modèle très utile

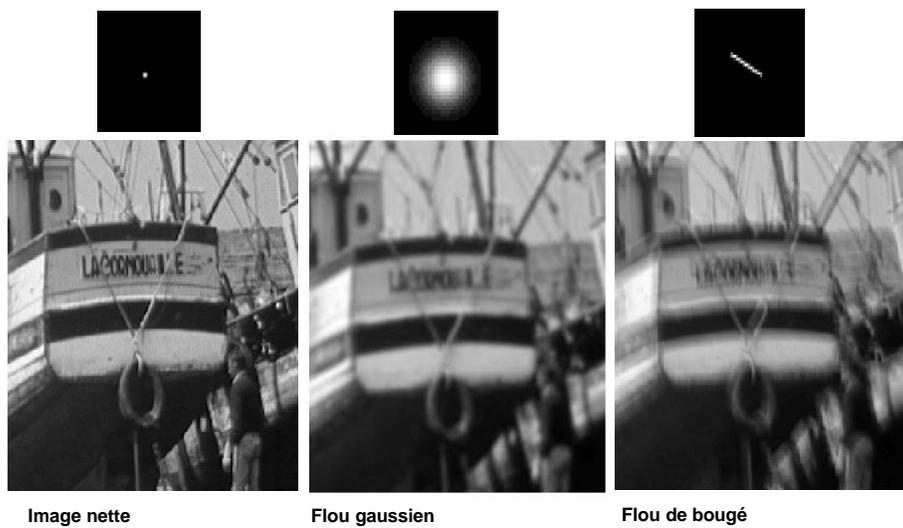
- Modèle convolution + bruit



T15 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Modèles de FEP et image



T16 – ENSTA – capteurs et +

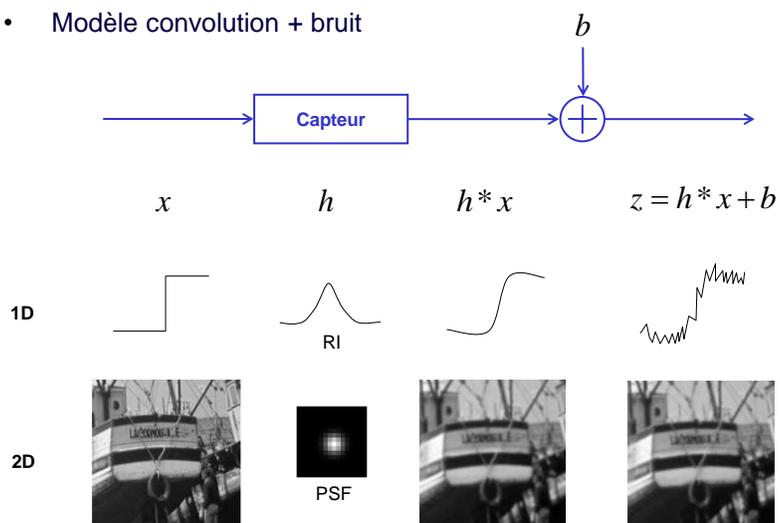
ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Plan du cours 1

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

## Comment "déconvoluer" $z$ pour retrouver $x$ ?

- Modèle convolution + bruit



## Plan du cours 1

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

T19 – ENSTA – capteurs et +



## Détecteur

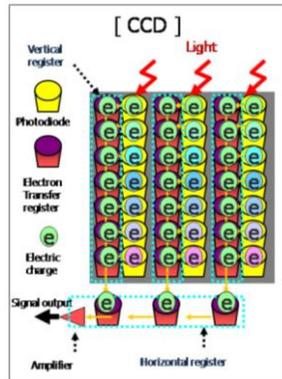


[www.familytechzone.com/2012/02/photography-101-cleaning-your-dslr-camera-sensor-with-sensorklean/](http://www.familytechzone.com/2012/02/photography-101-cleaning-your-dslr-camera-sensor-with-sensorklean/)

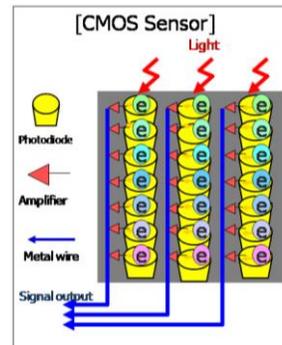
T20 – ENSTA – capteurs et +



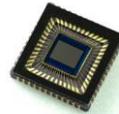
## CCD vs. CMOS



Charge-coupled device



Complementary Metal/Oxide/Semiconductor

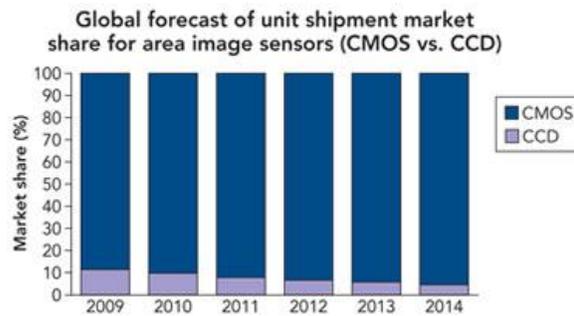


<http://www.digitalbolex.com/global-shutter/>

T21 – ENSTA – capteurs et +



## And the winner is...



Source: iSuppli, October 2010.

...CMOS !

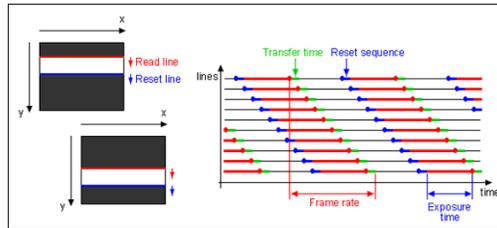
- Surtout une question de coût de fabrication
- Bientôt : CCD uniquement utilisés pour certaines applications professionnelles très exigeantes (astronomie)

T22 – ENSTA – capteurs et +



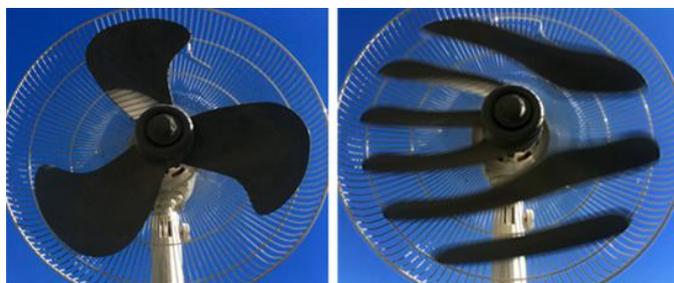
## Global shutter et rolling shutter

- 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

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



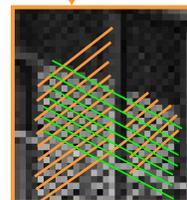
Zoom d'une zone de  
18x18 pixels

T25 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Échantillonnage et repliement

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



Les stores ≈ horizontaux  
ne le sont plus du tout !

T26 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Le repliement est (presque) inévitable en image

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



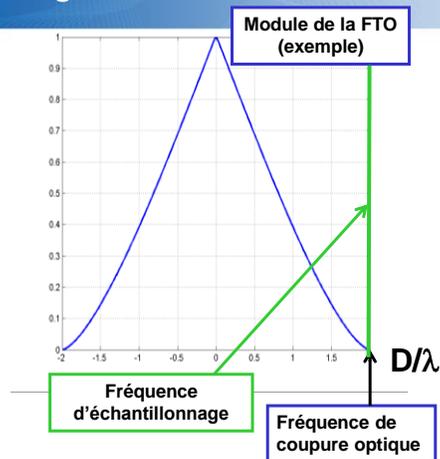
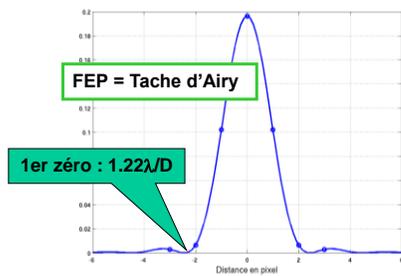
Image à Shannon



Image repliée

## Origine du sous-échantillonnage

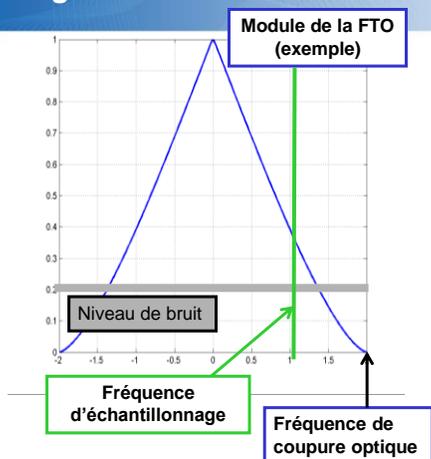
- Système limité par la diffraction
  - fonction de transfert optique



- Image bien échantillonnée mais floue

## Origine du sous-échantillonnage

- Système limité par la diffraction
  - fonction de transfert optique



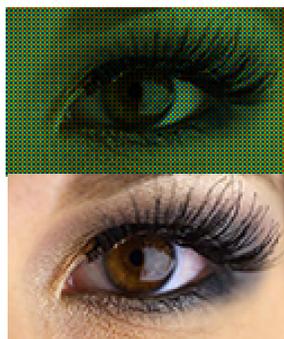
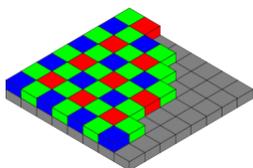
- Conception optique : compromis
  - ⇒ implique en général un **sous-échantillonnage** relativement à Shannon-Nyquist

T29 – ENSTA – capteurs et +



## Capteur couleur

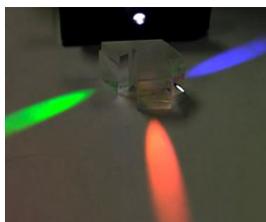
Multiplexage spatial  
Schéma Bayer



www.red.com

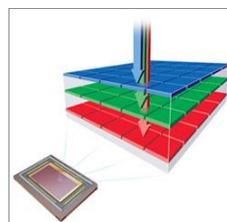


TriCCD sony



Dick Lyon wikipedia

Capteur Foveon X3  
Foveon.com



DSLR Sigma SD9

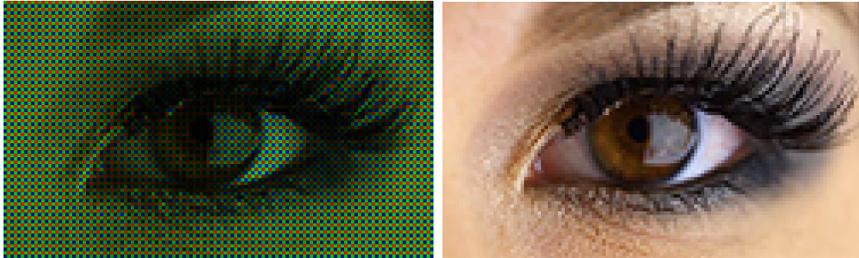
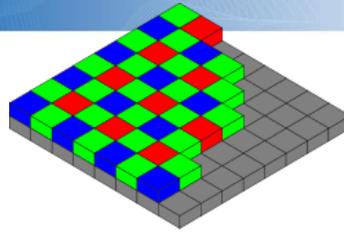
T30 – ENSTA – capteurs et +



## 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>



T31 – ENSTA – capteurs et +

www.red.com  
**ONERA**  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Bruit



T32 – ENSTA – capteurs et +

www.red.com  
**ONERA**  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Bruit



T33 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## 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>

T34 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Bruit spatial fixe

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



T35 – ENSTA – capteurs et +



## Plan du cours 1

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

T36 – ENSTA – capteurs et +



## Comment réduire l'effet du bruit ?



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

T37 – ENSTA – capteurs et +



## Plan du cours 1

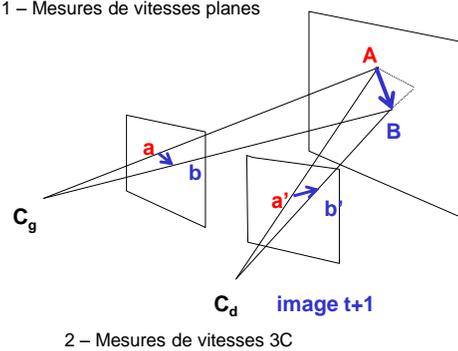
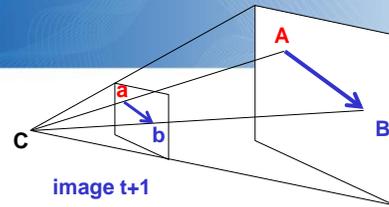
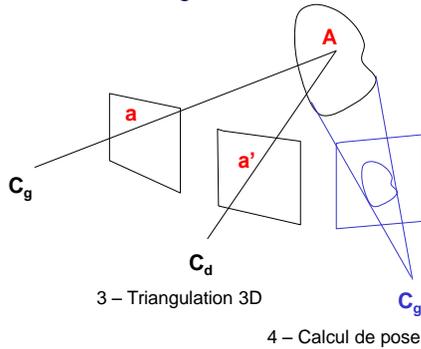
- Schéma de principe d'un capteur imageur numérique
- Système optique
  - Intermède : déconvolution
- Détecteur
  - Intermède : débruitage
- **Etalonnage géométrique**

T38 – ENSTA – capteurs et +

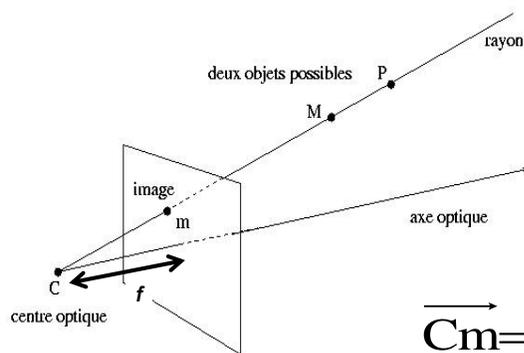


## Photogrammétrie

- Principes de mesures géométriques à partir d'images



## Modèle géométrique de la prise d'image



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

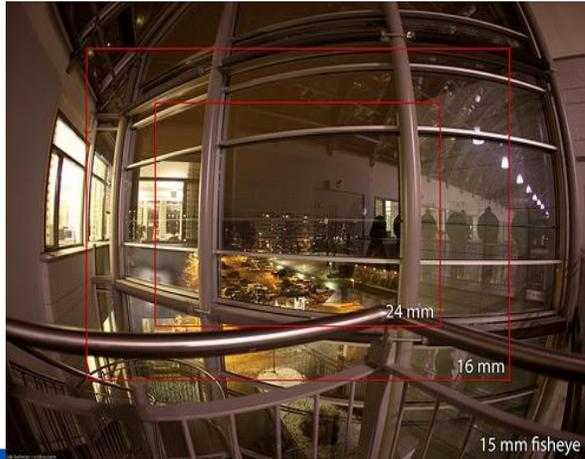
- Modèle sténopé
  - Equation de projection centrale
  - Propriété : conservation des droites

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

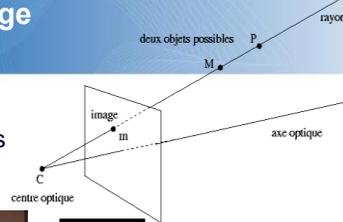
## Modèle géométrique de la prise d'image

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

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



T41 – ENSTA – capteurs et +



distorsion en barillet

pas de distorsion

distorsion en coussin

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Un modèle géométrique plus réaliste

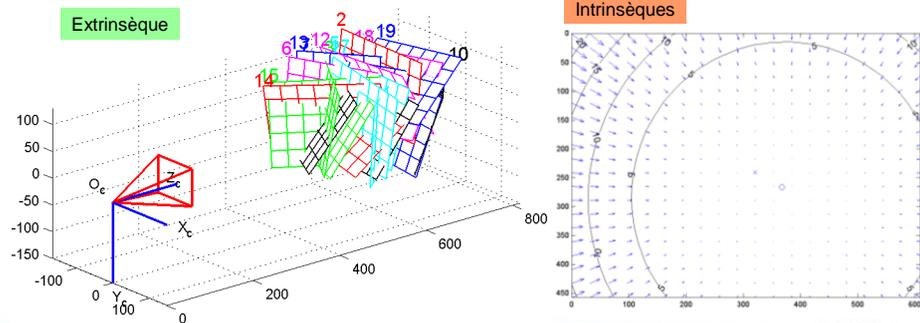
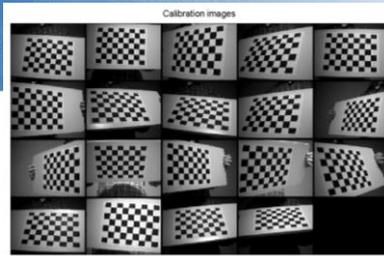
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déplacement monde → caméra : <math>X_c = RX + T</math></li> </ul> Paramètres extrinsèques	6
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projection centrale</li> </ul> $\begin{cases} x = f X_c / Z_c \\ y = f Y_c / Z_c \end{cases}$	1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distorsion</li> </ul> $\begin{cases} \tilde{x} = x(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \tilde{y} = y(k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases}$	2 à 5
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numérisation</li> </ul> Paramètres intrinsèques	4
$\begin{cases} u = p_u \tilde{x} + u_0 \\ v = p_v \tilde{y} + v_0 \end{cases}$	

T42 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Calibrage géométrique de camera

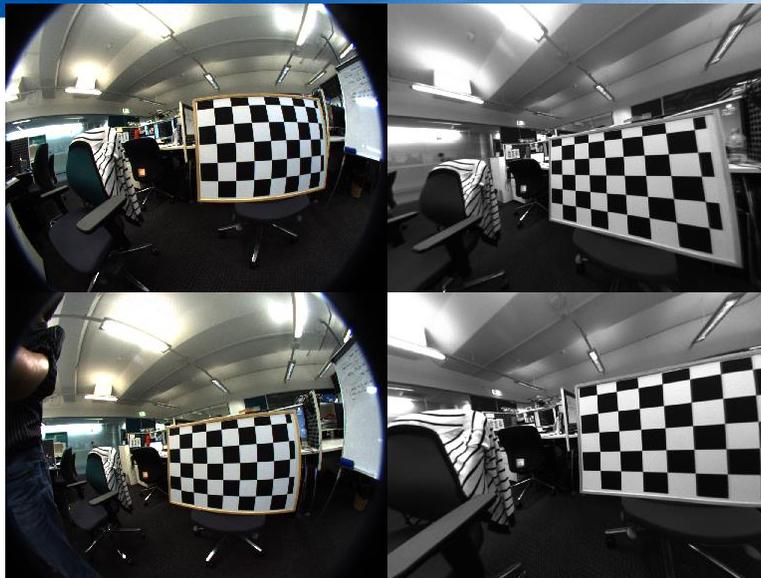
- Plusieurs softs sur le web
  - [Matlab Calibration Toolbox J-Y Bouquet]
  - Simples d'emploi
    - Utilisent des images de mire plane



T43 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## Rectification des images



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

T44 – ENSTA – capteurs et +

ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

## 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 2 = optique adaptative