



# Master 1 EEA

Parcours SIA2 + IM

UE

Capteurs optiques  
et formation des images



## Plan du cours (12 h C/TD et 18h TP)

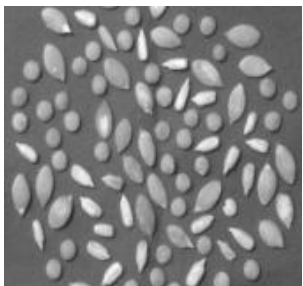
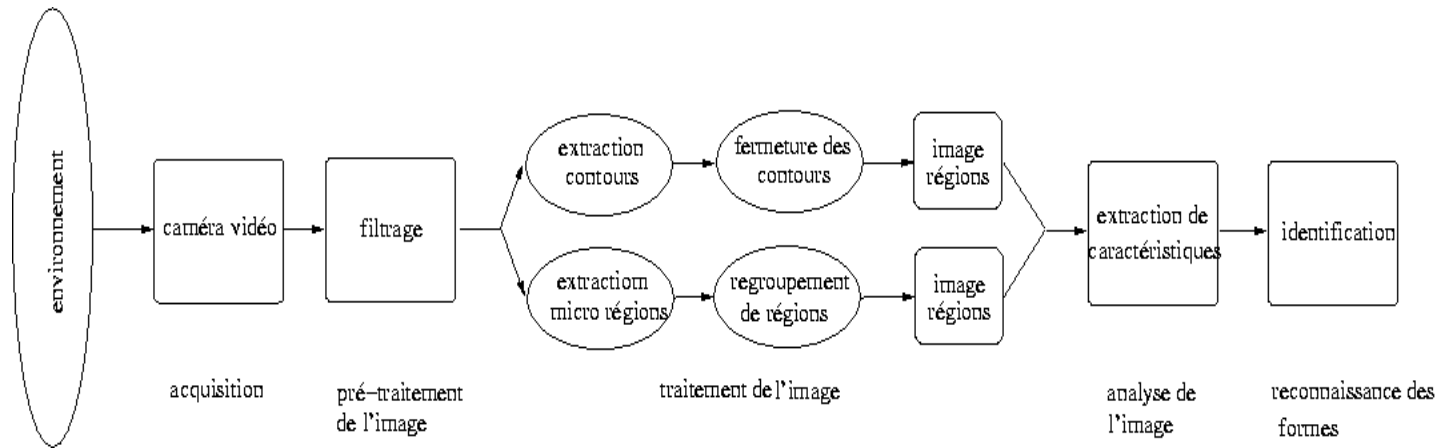
1. **Colorimétrie (0.5h)**
2. Acquisition des images (3h)
3. Techniques d'éclairage (0.5h)
4. Restauration des images par des exemples (3h)
5. Inspection optique par des exemples (1h)

TP illustratif : 6h TP

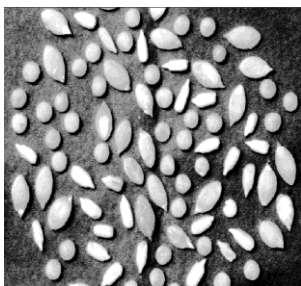
Intervention de O.Godet : 4h C/TD, 12h TP



## La chaîne de traitement des images



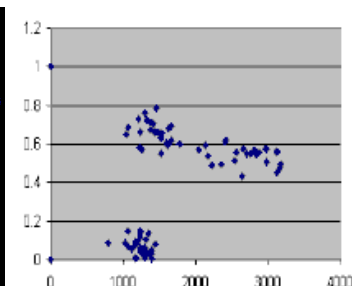
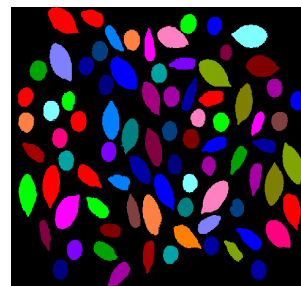
Acquisition



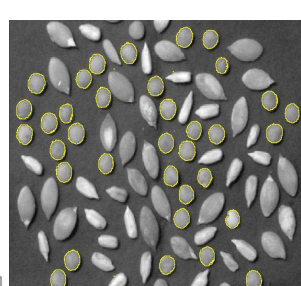
prétraitement



traitement



analyse

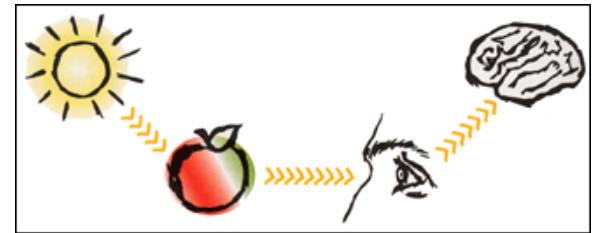
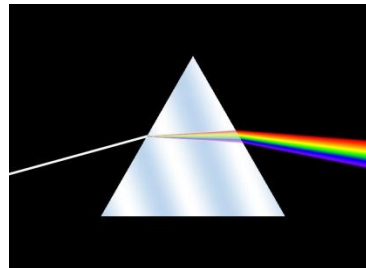
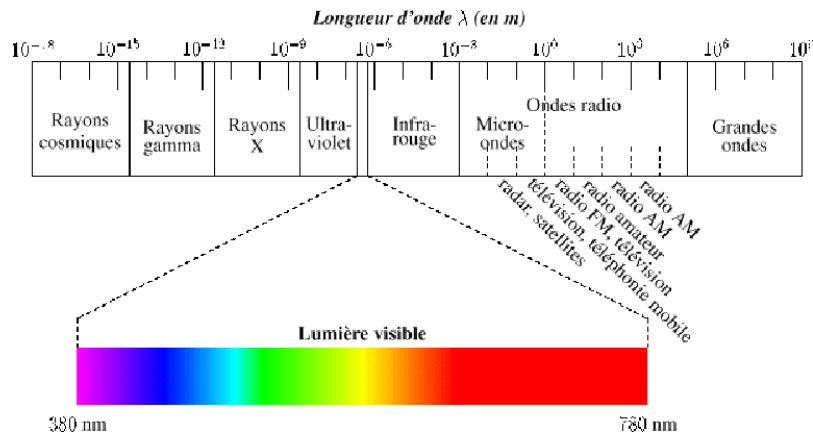


interprétation



# Colorimétrie

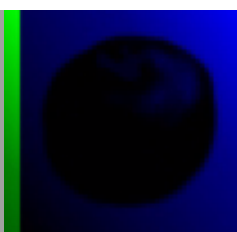
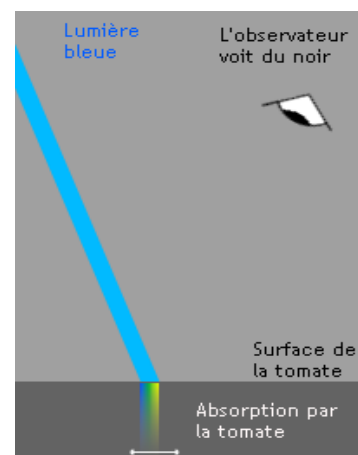
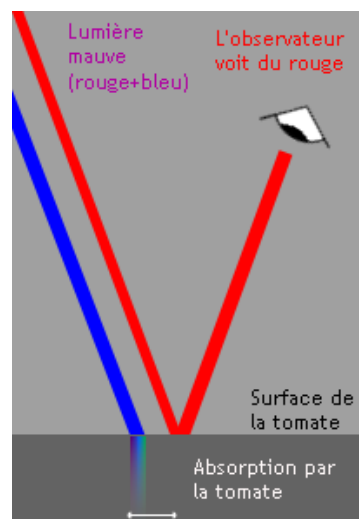
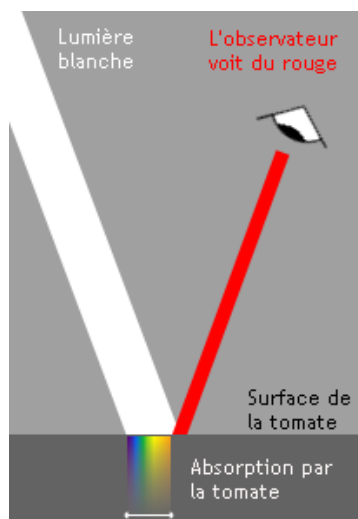
- Composition de la lumière
  - Sensation produite par les ondes électromagnétiques dans le spectre du visible



- Lumière blanche = somme de toutes les couleurs du spectre
- Couleur... une grandeur subjective

# Colorimétrie

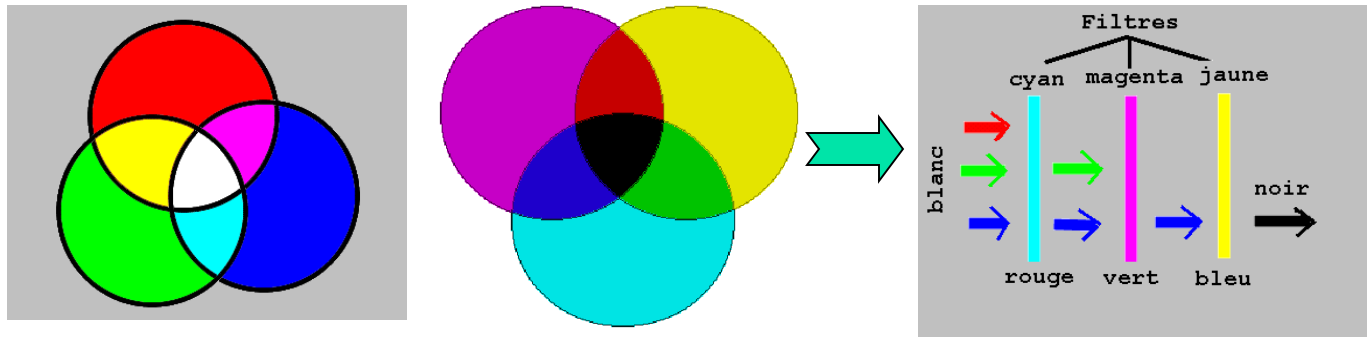
- Couleur d'objet liée à :
  - Absorption sélective de certaines longueurs d'onde et réflexion des autres
  - Constitution de la lumière





# Colorimétrie

- Synthèse additive et soustractive



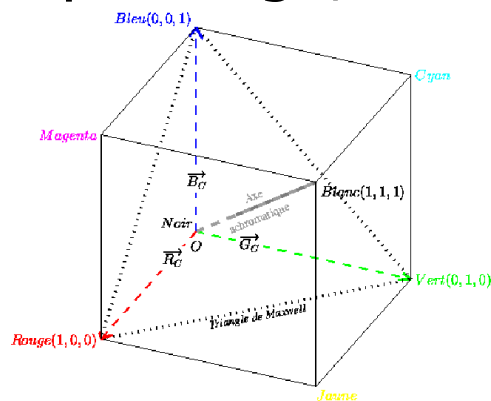
- La couleur, une grandeur vectorielle...
- Nombreux espaces colorimétriques
  - Systèmes de primaires
  - Systèmes luminance-chrominance
  - Systèmes d'axes indépendants



# Colorimétrie

## ■ Systèmes de primaires

- Exemples : rgb, YUV (PAL), YIQ (NTSC)

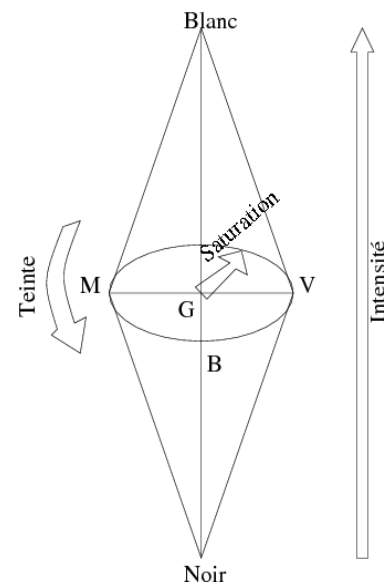


$$r = \frac{R}{R+G+B}, g = \frac{G}{R+G+B}, b = \frac{B}{R+G+B}$$

## ■ Systèmes luminance-chrominance

- Exemples : ITS, HSV, etc.

$$I = \frac{R+G+B}{3}, T = \arctan \frac{\sqrt{3}(G-B)}{(2R-G-B)}, S = 1 - 3 \cdot \frac{\min(R,G,B)}{R+G+B}$$



# Segmentation HSV

- On souhaite isoler la fleur jaune?

Image dont l'on veut segmenter la fleur jaune





# Segmentation HSV

- Isoler les pixels dans un intervalle de valeurs de teinte (Hue)

Pixels pour lesquels  $H > 0.05$  ET  $H < 0.25$



# Segmentation HSV

- Isoler les pixels dans un intervalle de valeurs de saturation (Saturation)

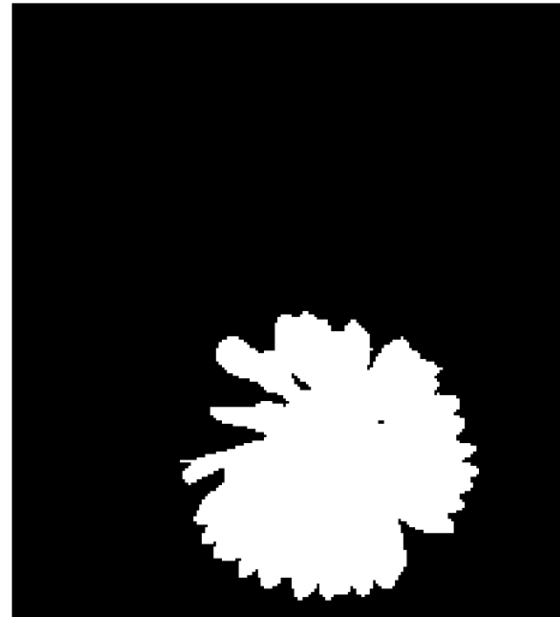
Pixels pour lesquels  $S > 0.75$



# Segmentation HSV

- Identification des pixels aux deux images précédentes

Pixels pour lesquels  $H > 0.05$  ET  $H < 0.25$  ET  $S > 0.75$

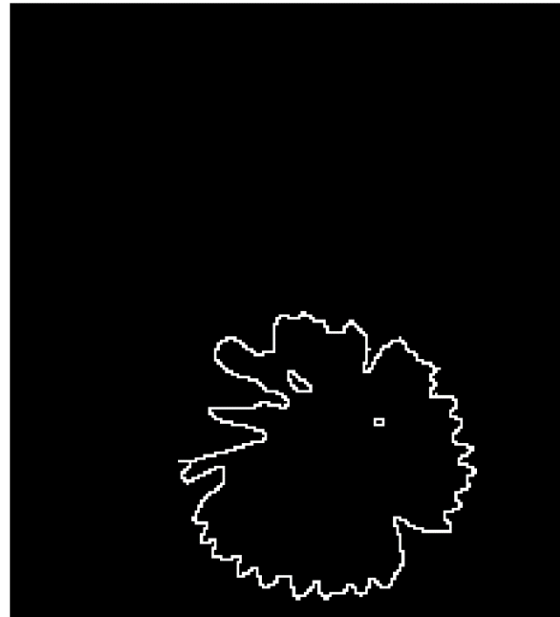




# Segmentation HSV

- Identification du contour de la région isolée précédemment

périm`etre de la fleur jaune



# Segmentation HSV

- Superposition du contour à l'image initiale

Résultat de la segmentation



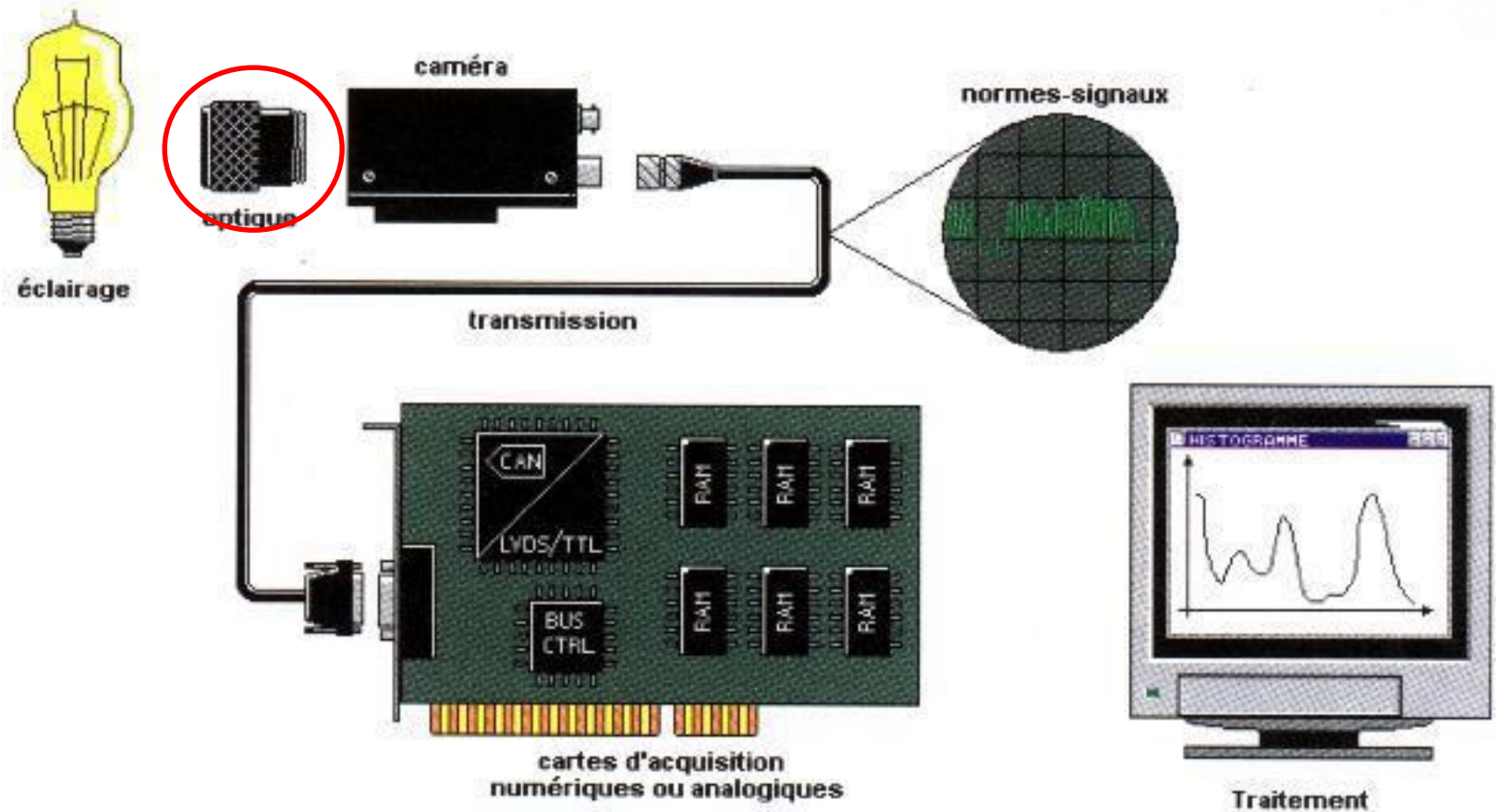


## Plan du cours (12 h C/TD et 18h TP)

1. Colorimétrie (0.5h)
2. **Acquisition des images (3h)**
3. Techniques d'éclairage (0.5h)
4. Restauration des images par des exemples (3h)
5. Inspection optique par des exemples (1h)



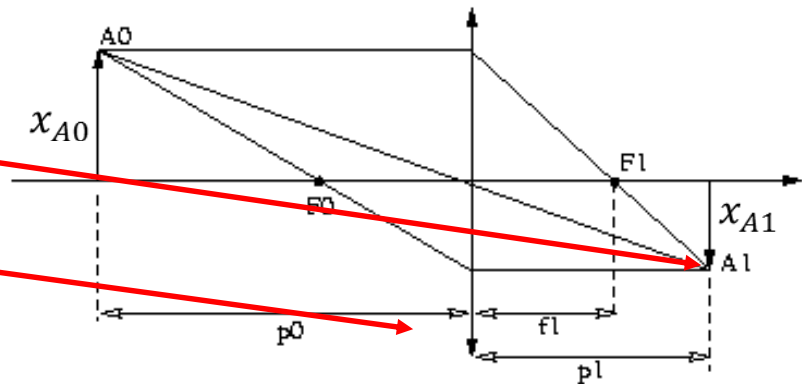
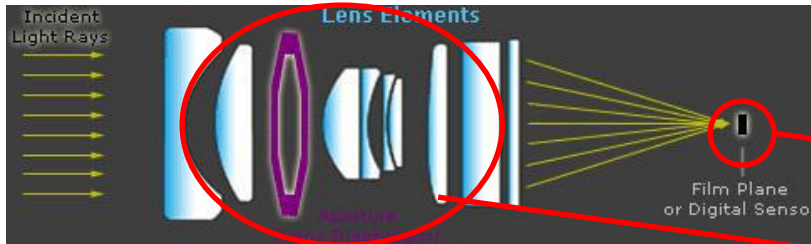
# Optique de caméra





# Optique de caméra

## ■ Modèle d'optique mince



## ■ Définitions

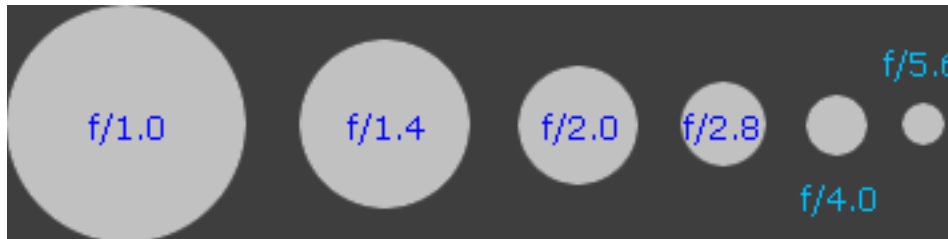
- Foyer image vs. foyer objet
- Tirage optique
- Grandissement transversal :  $G_t = \frac{x_{A1}}{x_{A0}} = \frac{p_1}{p_0}$
- Distance focale ou focale
- Relation de conjugaison :  $\frac{1}{f_1} = \frac{1}{p_0} + \frac{1}{p_1}$





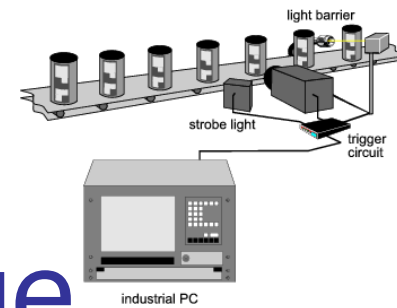
# Paramètres d'une optique

- La focale – zoom = objectif à focale variable
- Le « focus » (mise au point) = régler la netteté sur des objets à différentes distances
- L'iris (« aperture ») = régler la quantité de lumière traversant l'objectif – nombre ouverture (n.o)



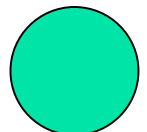
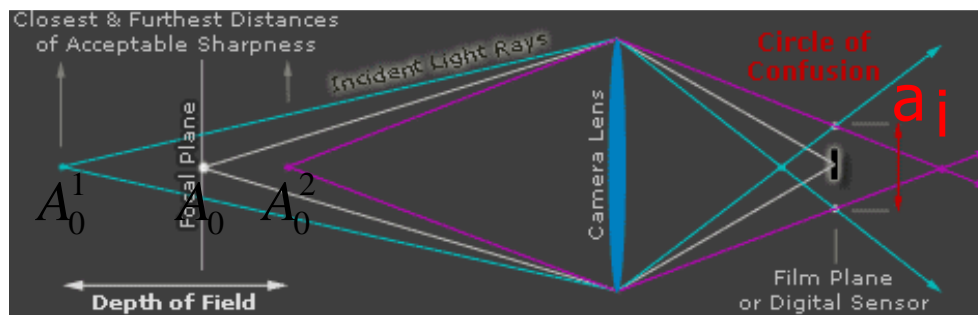
- Le « shutter » ou temps d'exposition





# Paramètres d'une optique

- Compromis ouverture – temps exposition !
- Profondeur de champ
  - Zone de netteté en avant et arrière de la scène
  - Formalisme :  $Pdc = A_0^1 A_0^2 = \frac{2 \cdot a_i \cdot n \cdot o}{f^2} P_0^2$



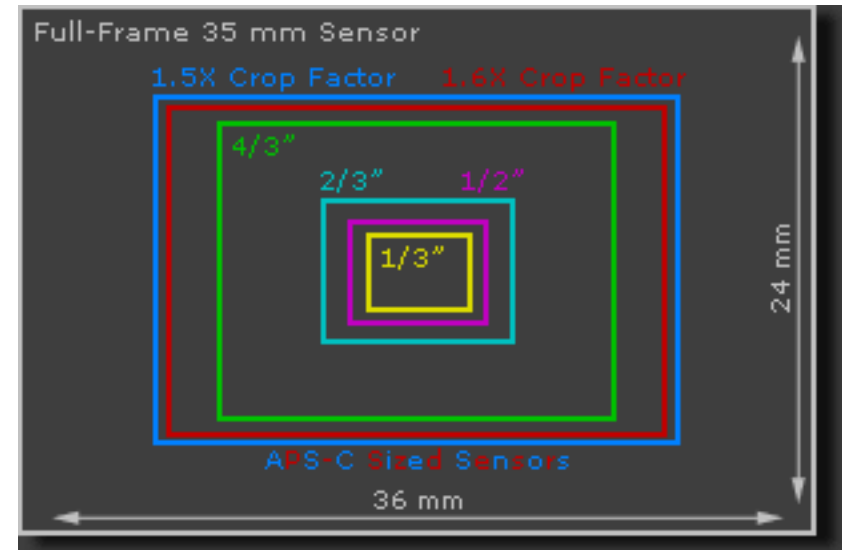


# Paramètres d'une optique

## ■ Angle de champ

- Défini par  $2\theta$  tel que  $\tan(\theta) = \frac{D}{2.f}$  avec  $D$  la diagonale de la rétine
- Format usuel de rétine (dans la caméra) :

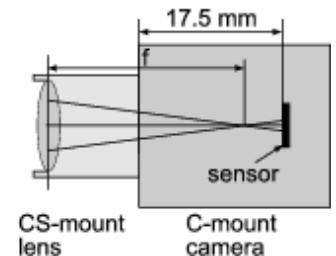
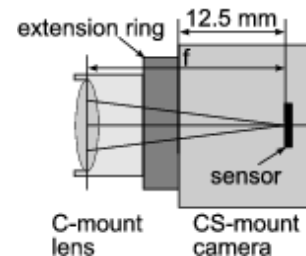
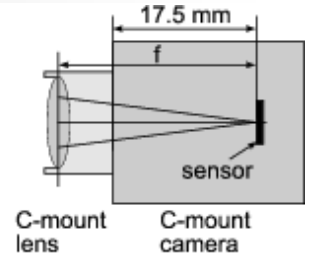
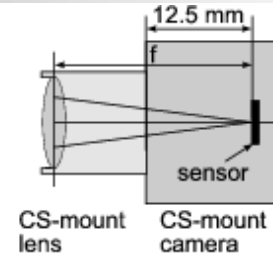
TAILLE NOMINALE DU CAPTEUR	TAILLE STANDARDISÉE	DIAGONALE DE LA MATRICE CCD
1 pouce	12.8 mm x 9.6 mm	16 mm
2/3 pouce	8.8 mm x 6.6 mm	11 mm
1/2 pouce	6.4 mm x 4.8 mm	8 mm
1/3 pouce	4.8 mm x 3.6 mm	6 mm
1/4 pouce	3.2 mm x 2.4 mm	4 mm





# Optique : comment choisir ?

- Dictée par l'application...
  - Focale
  - Ouverture min et max
  - Monture C ou CS
  - Bague allonge /adaptation
- Exercices

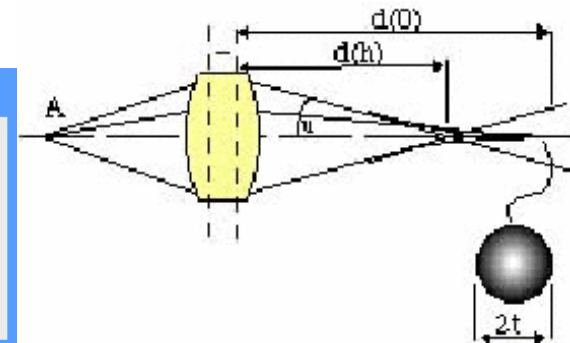
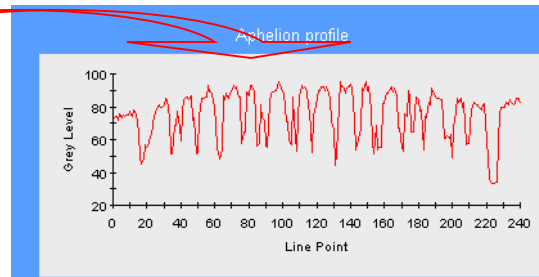
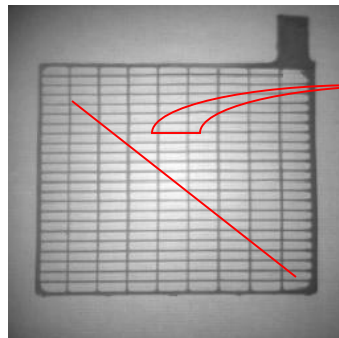
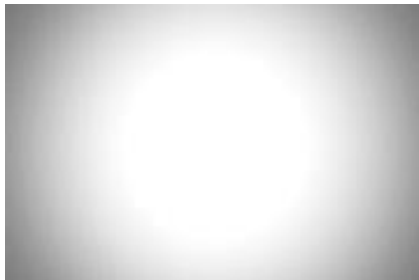


- Calculer la focale pour le cas suivant : la taille de l'objet visualisé est assimilé à un segment de droite de 40 cm et le capteur est à 1m; On choisit une rétine 2/3 ''.
- Calculer la focale pour le cas suivant : angle de vue de 90° et un objet situé à 1m, rétine de 2/3''



# Aberrations optiques

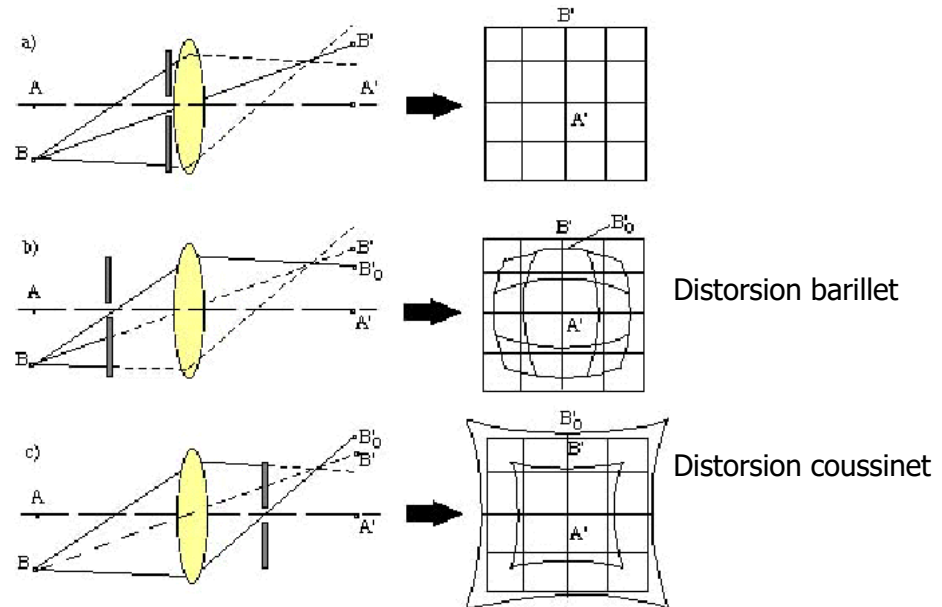
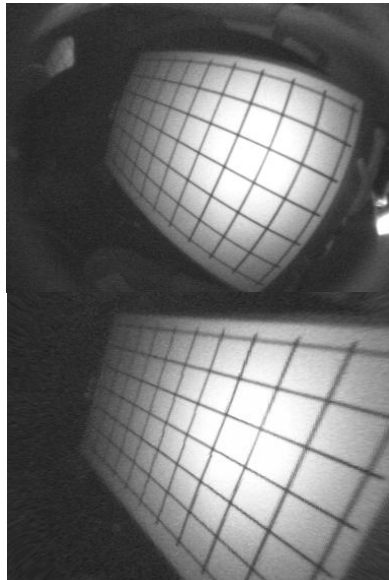
- Aberrations radiométriques
  - Vignettage : éclairage non uniforme dans le plan image – dû à l'occultation des rayons marginaux
- Aberrations géométriques
  - Coma, astigmatisme, courbure de champ, **sphérique**, distorsion
  - Sphérique = défocalisation sur les bords de l'image – convergence différente entre rayons marginaux et paraxiaux





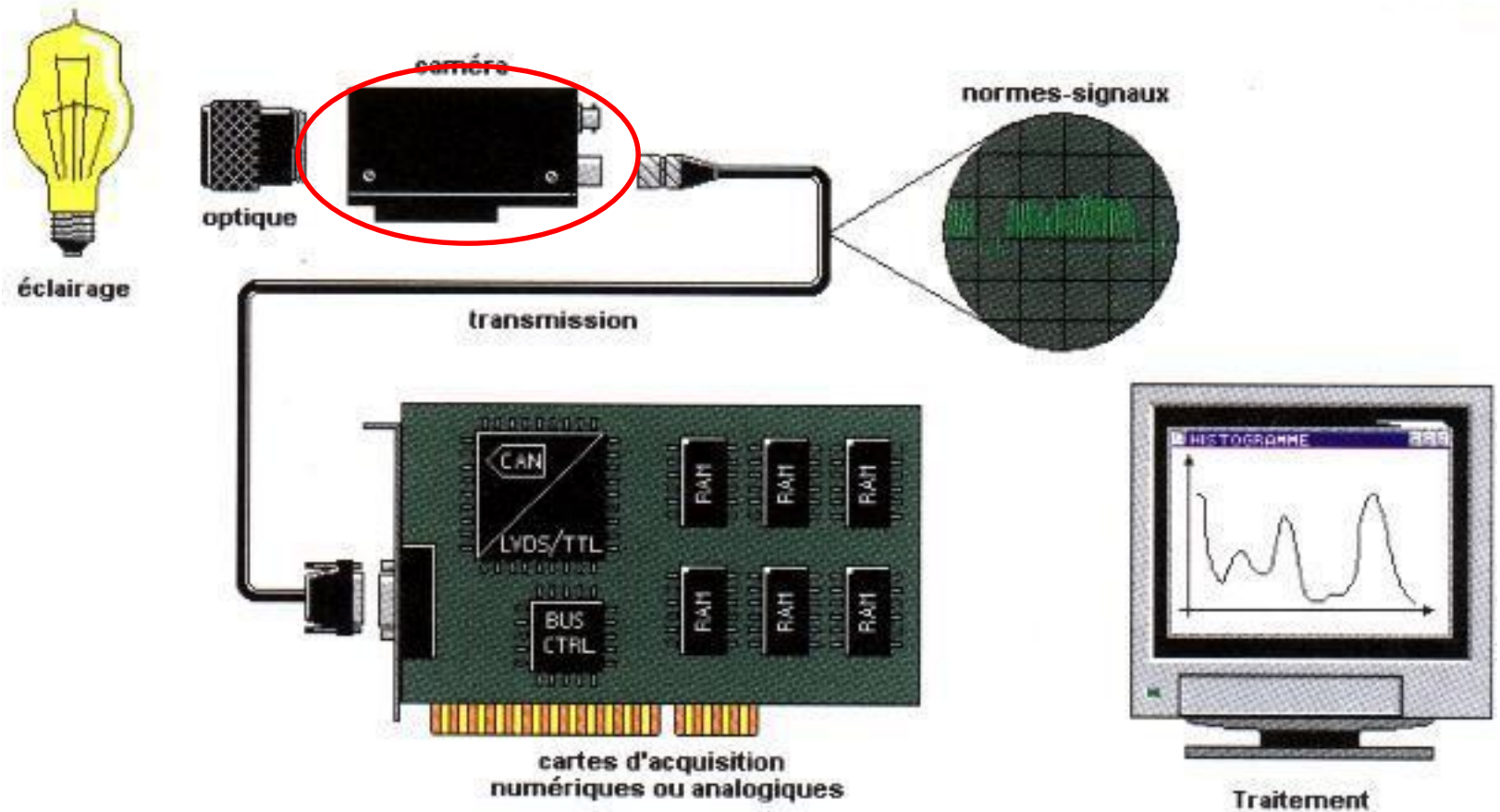
# Aberrations optiques

- Aberrations géométriques
  - Coma, astigmatisme, courbure de champ, sphérique, **distorsion**
  - Distorsion = déformation géométrique – dépend de la position du diaphragme / éléments optiques





# Capteurs vidéo

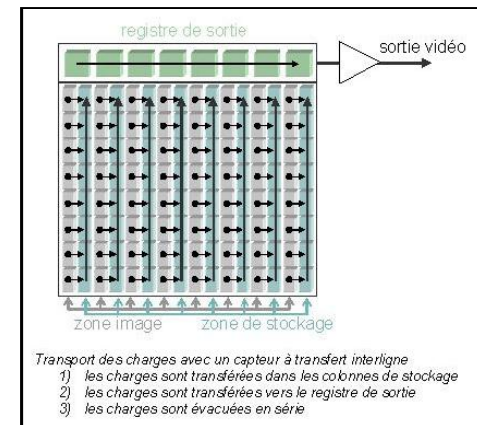
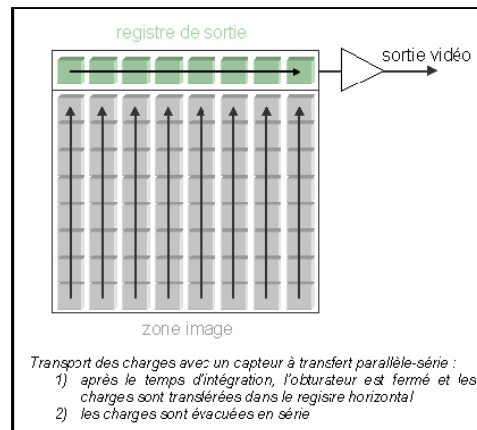
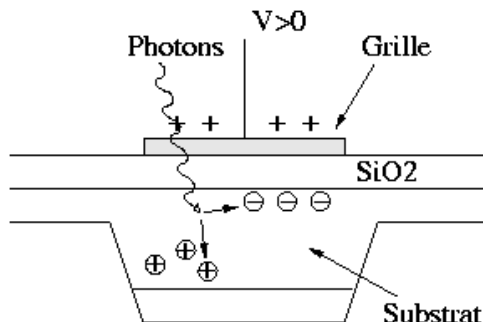






# Technologie CCD

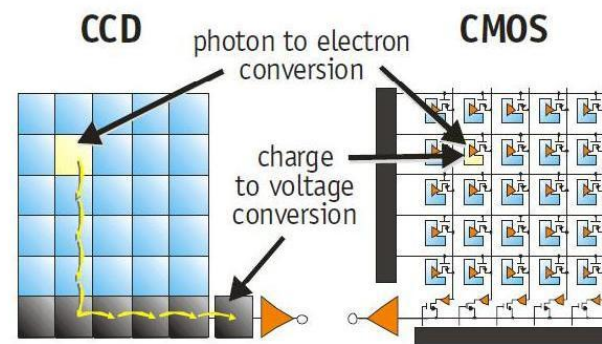
- CCD pour « Charge Coupled Device »
- Principe :
  - transduction lumière-charge
  - accumulation puis transfert *via* des registres (avec des variantes) avant conversion





# Capteur CMOS

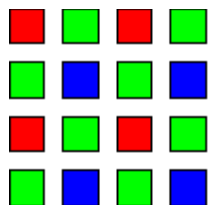
- Fabrication identique aux chips informatiques
- Principe:
  - Conversion photon-électron (idem CCD)
  - Conversion directe de la charge avant transfert
  - Photo-élément adressable → « rolling shutter » pour accroître la sensibilité



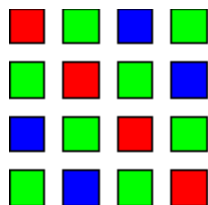
**Figure 3.** CCDs move photogenerated charge from pixel to pixel and convert it to voltage at an output node; CMOS imagers convert charge to voltage inside each pixel.

# Caméra couleur

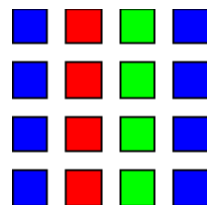
- 2 technologies sur le marché
- Solution #1: un seul capteur et des filtres (mono capteur)
  - Sensibilité des pixels différentes par des mosaïques de filtres
  - « demosaicing » par plus proches voisins, bilinéaire, etc.
  - Très utilisée...



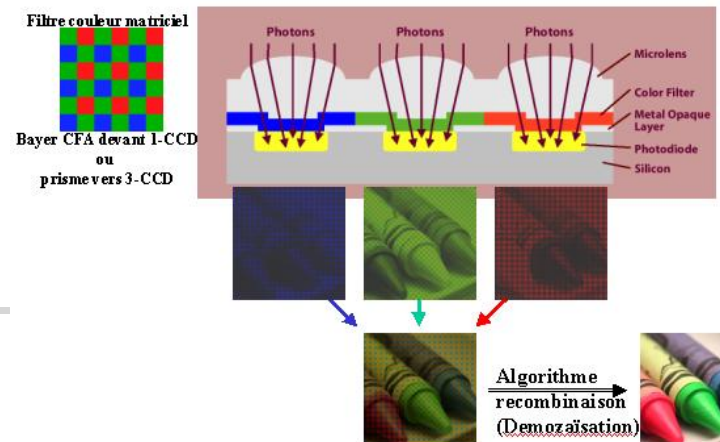
Mosaïque Bayer



Mosaïque en diagonale



Mosaïque par colonnes



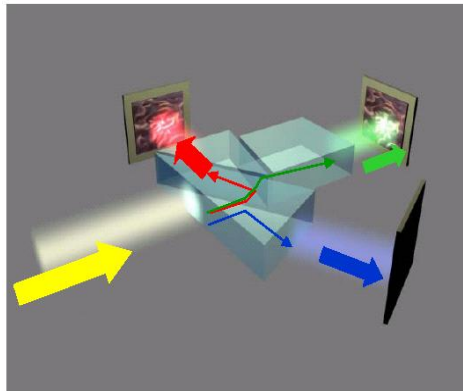
$$h_G(x) = \begin{cases} \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & x \in \{x_R, x_B\}, \\ \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & x \in x_G, \\ \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} & x \in x_B, \end{cases}$$

$$h_B(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & x \in x_G, \\ \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} & x \in x_R \end{cases}$$

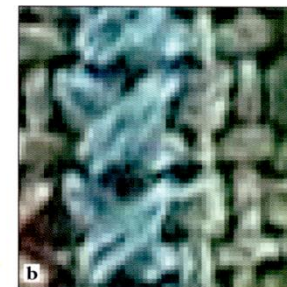


# Caméra couleur

- Solution #2: trois capteurs et un prisme optique (tri capteur)
  - 3 rétines sensibles à une longueur d'onde
  - Coût (alignement des capteurs) ↗ mais qualité ↗



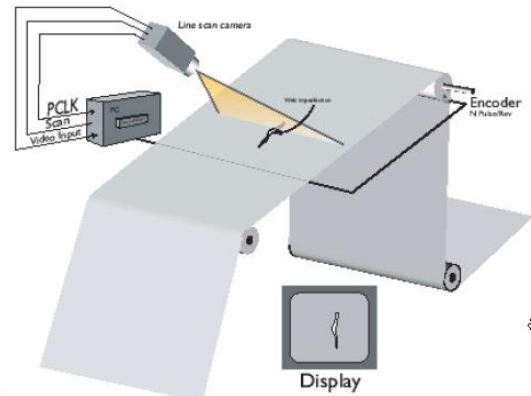
Tri-captur



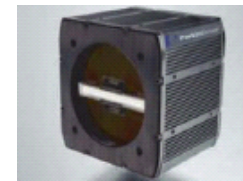
Mono capteur



# Caméra linéaire



- Une seule barrette de photo-éléments

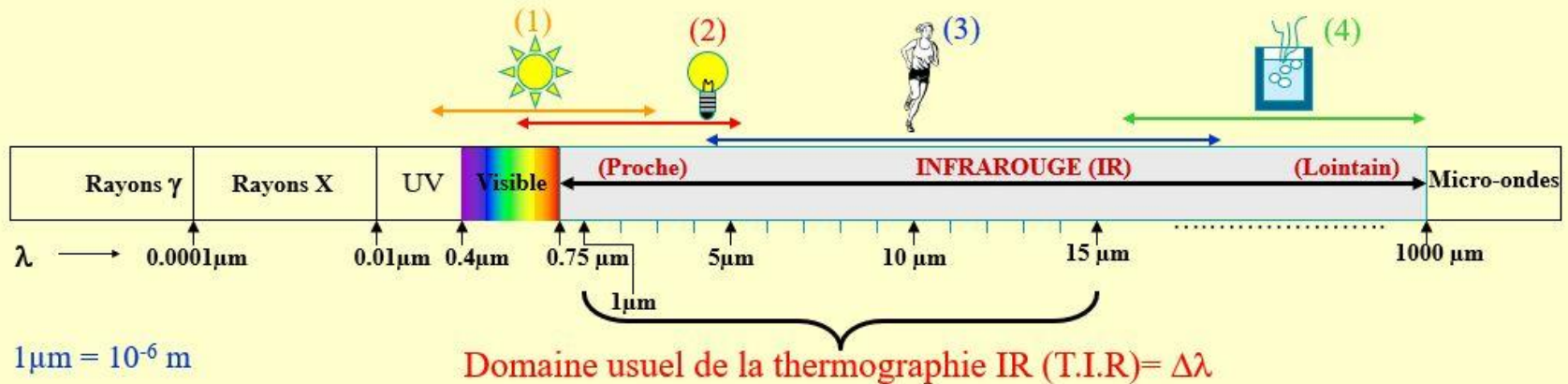


- Acquisition d'images matricielles avec résolution ↗
- 3 modes de traitement :
  - Ligne à ligne : simple présence de matière/trous
  - Groupe de lignes : début acquisition par le trigger et nombre de lignes pré-défini (contrôle sur laminoir)
  - En continu : fonctionnement cyclique (inspection de textile ou tissu)



# Caméra infrarouge (1/5)

Spectre des longueurs d'onde  $\lambda$  : où se trouve l'infrarouge ?



- (1) Représente la plage spectrale d'émission du soleil /  $T_{\text{surface}} = 5800 \text{ K}$
- (2) Représente la plage spectrale d'émission d'une lampe à filament /  $T_{\text{surface}} = 2800 \text{ K}$
- (3) Représente la plage spectrale d'émission du corps humain /  $T_{\text{surface}} = 344 \text{ K}$  ( $35^\circ\text{C}$ )
- (4) Représente la plage d'émission de l'azote liquide /  $T_{\text{surface}} = 77 \text{ K}$

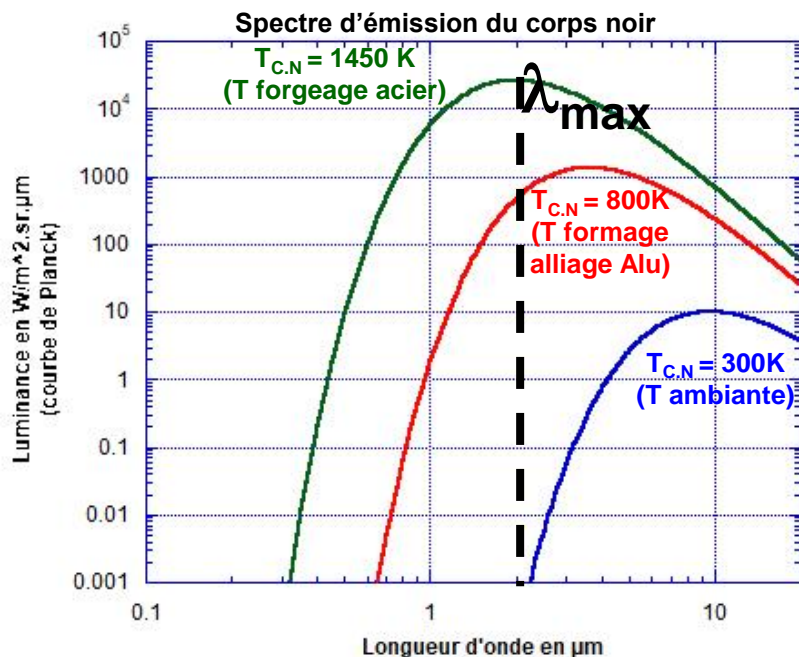
- Caméra classique pour réception NIR [700-1100nm] – Application : vidéosurveillance
- Caméra spécifique pour réception IR [2, 15 $\mu\text{m}$ ] – Applications : isolation de bâtiments, militaire, etc.



Corps noir réel à cavité  
Régul. Therm. entre [50, 550°C]

# Caméra infrarouge (2/5)

- Corps Noir = source de rayonnement IR de référence (étalon)



$$I^0(\lambda, T) = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

$$C_1 = 1.19088 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2},$$

$$C_2 = 1.4388 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

(Loi de Planck)

$$\lambda_{max} = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T_{CN}(\text{kelvin})}$$

Longueur d'onde du max  
D'émission du C.N  
(Loi de Wien)

96% de l'énergie rayonnée entre :

**0,5 λ<sub>max</sub> et 5λ<sub>max</sub>**

$$M_0(T) = \sigma \cdot T_{CN}^4$$

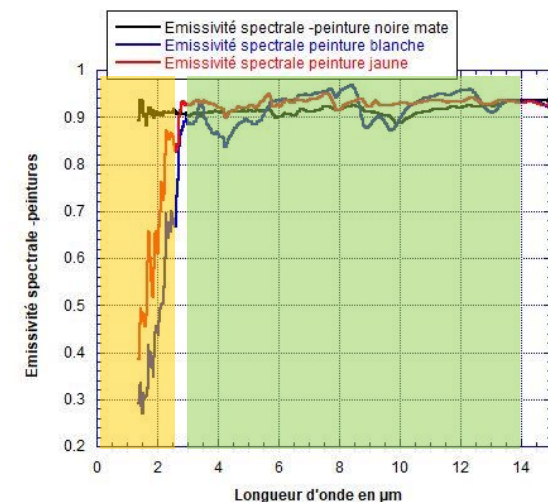
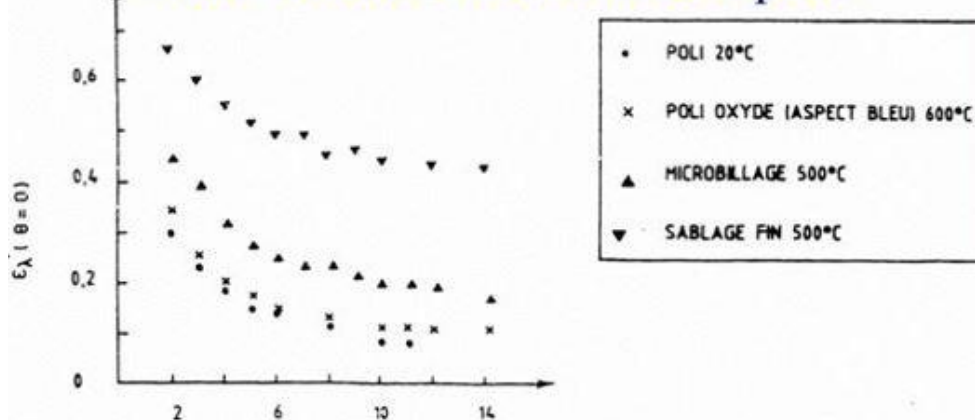




# Caméra infrarouge (3/5)

- Trois facteurs de choix de gammes spectrales des caméras IR (1/2) :
  - Niveau de  $T^\circ$  des objets ( $E \text{ émise} \sim T^4$ , loi de Wien)
  - Emissivité  $\varepsilon(.)$  des objets :  $I(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot I^0(\lambda, T)$

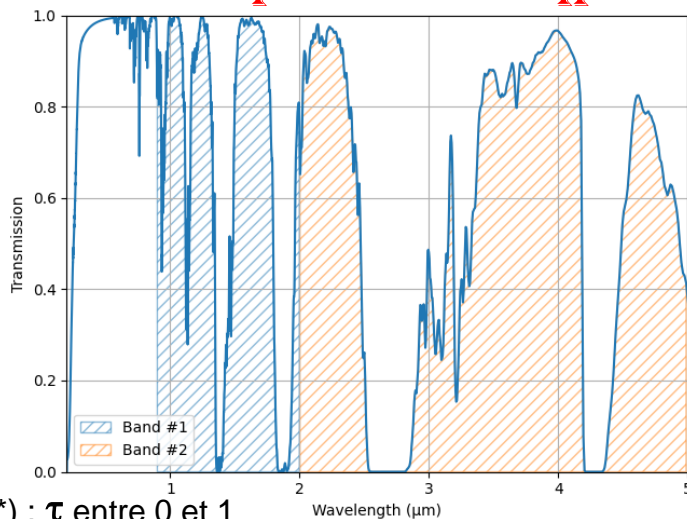
Steel : effect of the surface aspects



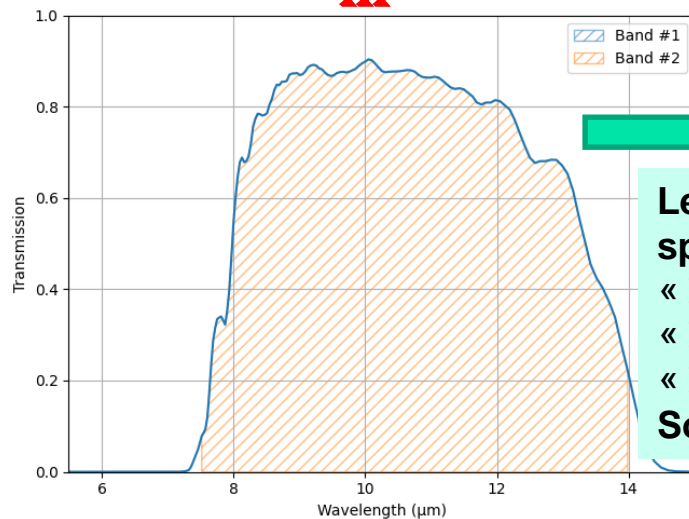
# Caméra infrarouge (4/5)

- Trois facteurs de choix de gammes spectrales des caméras IR (2/2) :

- Transmission atmosphérique : **I** **II** **III**



(\*) :  $\tau$  entre 0 et 1



Les bandes spectrales  
« **I** » [0,9-3 μm]  
« **II** » [3-5 μm]  
« **III** » [8-12 μm]  
Sont favorables

Epaisseur d'air de **500 m** - Contribution du **CO<sub>2</sub>** et de la **vapeur d'eau**,  
température ambiante **~300 K**



## Caméra infrarouge (5/5)

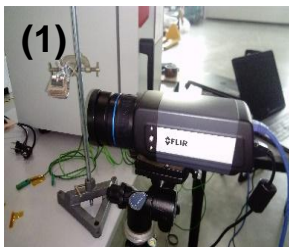
### ■ Types de caméras IR :

Caméra matriciel à détecteur photonique **InGaAs** / bande spectrale : **0,9 -1,7**

**μm** (dans la bande « **I** »),

objectif **50 mm**, taille pixel : **30 μm**, **320 x 256 pixels** – refroidie par système Peltier.

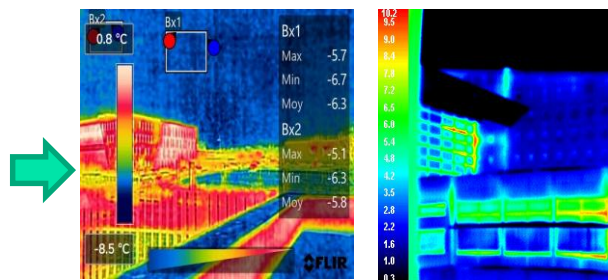
Dédiée à l'imagerie de réflectance proche IR ou à la thermographie dans la même bande pour les **hautes températures et plutôt les métaux** (corps opaques)



(1) Caméras matriciels à détecteur  $\mu$ -bolométrique (thermique), bande spectrale : **7,5 -13 μm** (dans la bande « **III** »), objectif **24,6 mm**, taille pixel : **17 μm**, **640 x480 pixels, non refroidis**. Fréquence image : jusqu'à 200 Hz en mode fenêtré, sinon typique **30 ou 50 Hz**,

**Résolution thermique : < 30 mK**

(2) Et (3) caméras en Bande III « **bas coût** », détecteur **160 x120 pixels** – bande spectrale : **8-14 μm**. (3) taille pixel : **12 μm**, fréquence image **~9 Hz** –dispose d'une caméra vidéo intégrée de 640 x480 pixels pour la fusion de contour « visible » sur l'image IR (mode MSX) ou incrustation de l'image IR sur l'image Visible. **Résolution thermique (3) ~100 mK.**



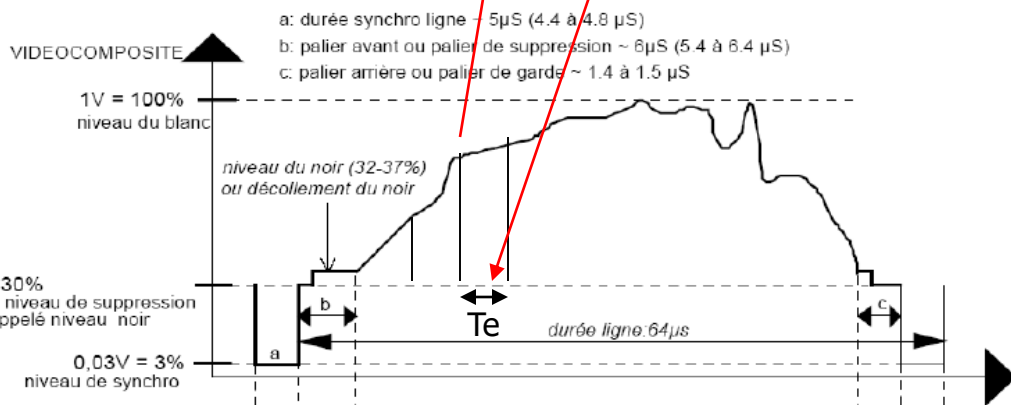
Images thermographie bâtiment en **BIII** (températures modérées et basses)

# Numérisation : du signal électrique à l'image numérique

- Les étapes :
  - Echantillonnage ( $T_e$ ) – lié au rapport 4/3
  - Quantification – liée au rapport S/B

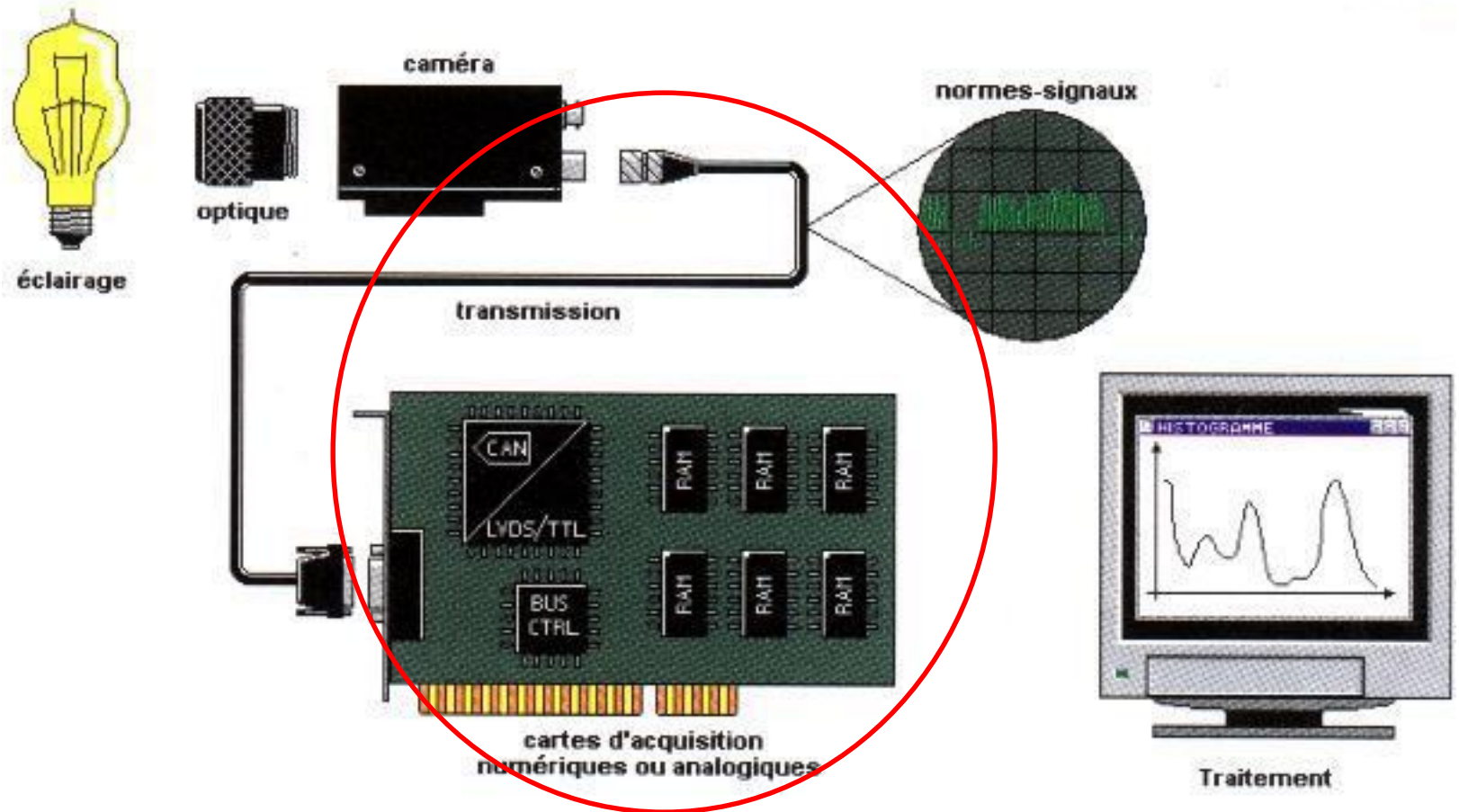
étape 2    étape 1

étape 3





# Transmission de l'image





# Transmission de l'image

## ■ Analogique

- 3 canaux (RGB, YUV), 2 canaux (Y/C), 1 canal (PAL)



## ■ Numérique

- Norme IEEE ou « firewire » : liaison série bidirectionnelle, format d'échantillonnage 4:2:2, diverses normes/débit *e.g.* 1394a (400 Mega bits /sec), besoin de répéteurs si distance.
- Norme USB : liaison série bidirectionnelle, format d'échantillonnage 4:2:2, diverses normes/débit
- Giga-ethernet





# Exercices

- Réalisation d'un système d'inspection : la caméra numérique, placée à 2m au dessus du plan de travail a les caractéristiques suivantes : rétine  $2/3''$ , résolution 640x480 pixels.
  - Calculer la focale de l'objectif pour que le pas entre 2 pixels soit de 0.5 mm dans le sens de la longueur.
  - Calculer le pas dans le sens de la largeur. Conclure.
  - Idem mais pour une caméra analogique, résolution 512x512.



# Exercices

- Réalisation d'un système de mesure 3D pour petits objets : la caméra a les caractéristiques suivantes : focale de 25 mm, rétine  $\frac{1}{2}$ ", résolution 640x480 pixels, sensibilité 0.25 lux (F/1.2). L'objet de diamètre 4 mm doit être plein champ lors de l'acquisition.
  - Calculer  $P_0$  et  $P_1$ .
  - Calculer  $a_i$ , en déduire la profondeur de champ minimale. Conclure.
- Caractérisation d'une caméra linéaire
  - Calculer la focale de son objectif sachant que elle comporte 1728 photo-éléments de  $13\text{ }\mu\text{m}$  et que :
    - L'objet à inspecter est placé à 10cm.
    - L'objet mesure 350 mm de diamètre.
    - L'objet occupe les  $\frac{2}{3}$  de la rétine
  - En déduire la résolution du capteur en mm/pixel. Conclure.



## Plan du cours (12 h C/TD et 18h TP)

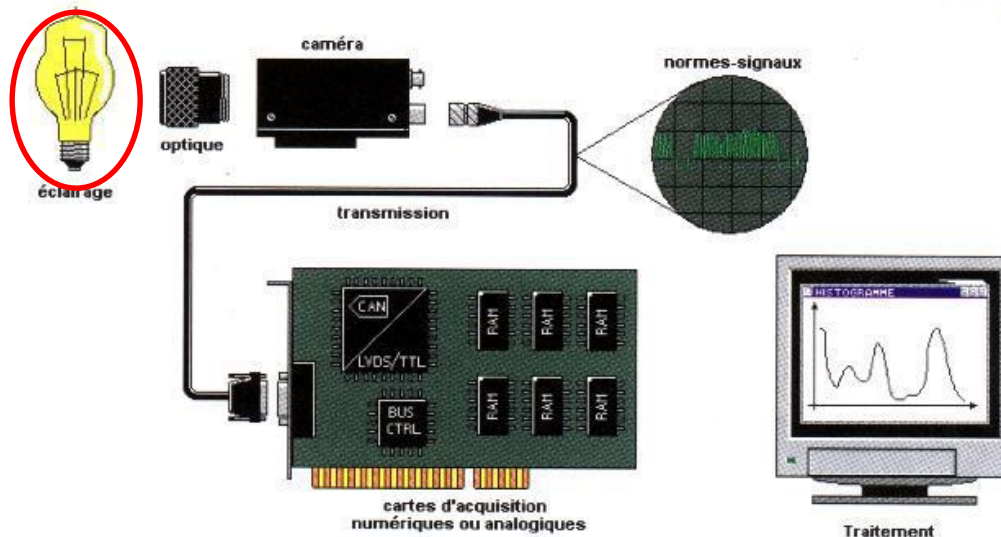
1. Colorimétrie (0.5h)
2. Acquisition des images (3h)
3. **Techniques d'éclairage (0.5h)**
4. Restauration des images par des exemples (3h)
5. Inspection optique par des exemples (1h)





# Eclairage

- Objectifs :
  - Accroître le contraste sur les objets
  - Limiter l'influence de l'éclairage ambiant
  - Accroître la cadence d'acquisition







# Types d'éclairage

- LEDs : flexibilité, allumage synchronisable ou séquentiel, spectre visible / non visible, durée de vie

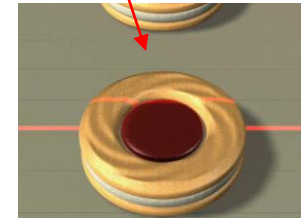
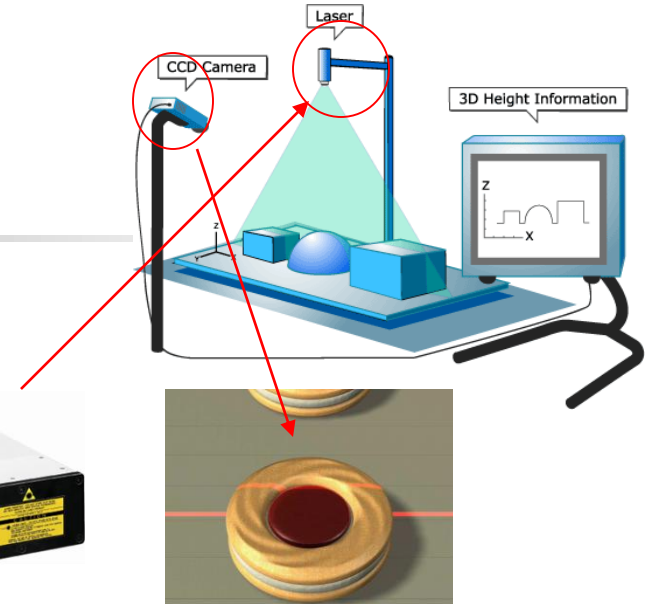




# Types d'éclairage

## ■ Laser

- Peu divergent
- Structuré
- Observation par une caméra déportée
- Appliqué aux surfaces peu texturées





# Stratégies d'éclairage

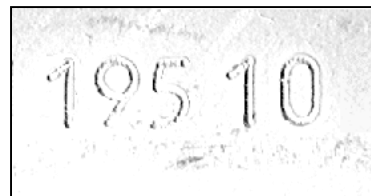
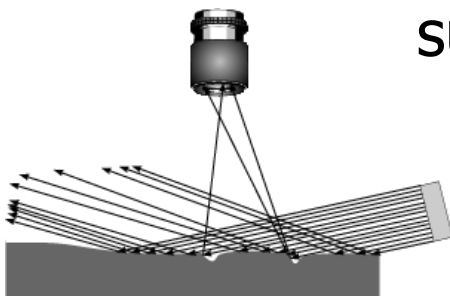
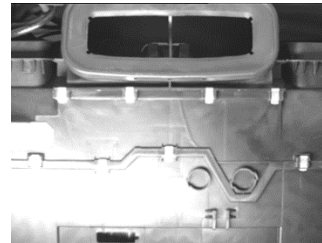
- Episcopie :

- Eclairage diffus

- Minimiser les réflexions spéculaires
    - Éclairage indirect ou à travers un réflecteur diffus

- Eclairage directionnel

- Angles d'incidence pour éviter les réflexions de surfaces lisses

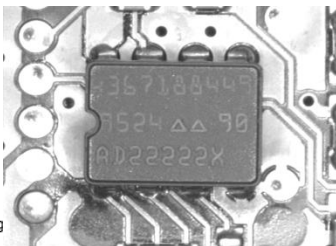
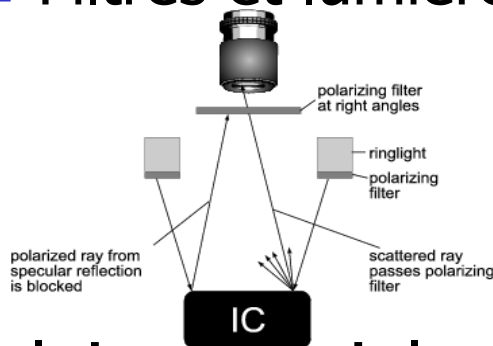
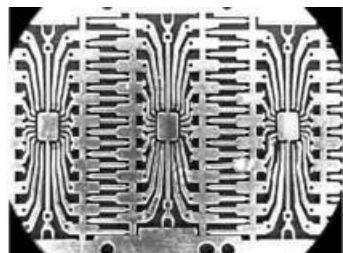


# Stratégies d'éclairage

## ■ Episcopie :

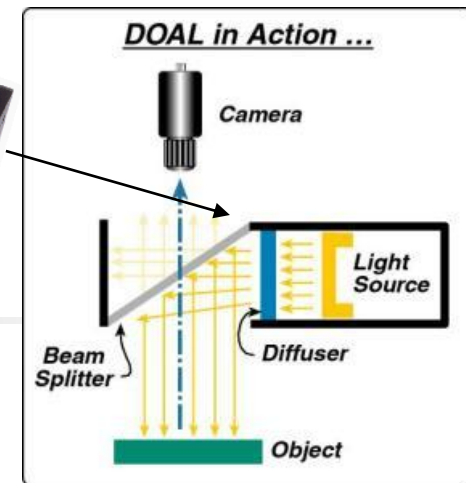
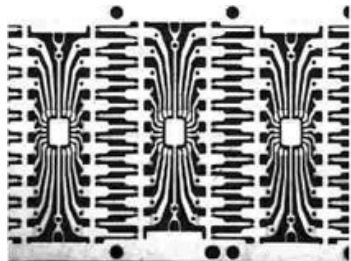
### ■ Eclairage polarisant

#### ■ Filtres et lumières polarisants



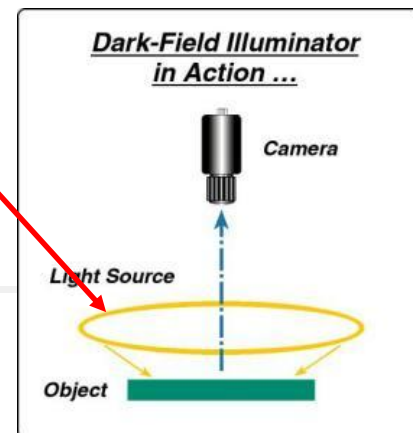
### ■ Eclairage axial ou coaxial

- Centrer sur l'axe optique – supprimer les ombres sur surfaces spéculaires  $\perp$  axe optique
- Inspection sur des surfaces réfléchissantes planes





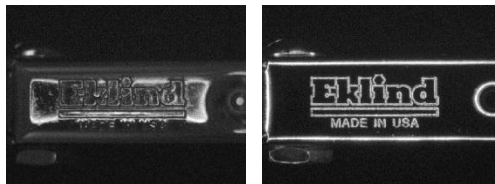
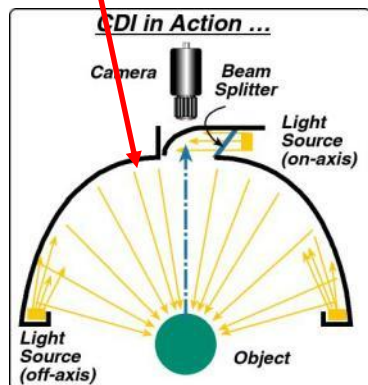
# Stratégies d'éclairage



## ■ Episcopie :

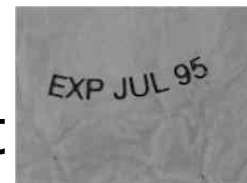
### ■ Eclairage annulaire rasant

- Mise en évidence de surfaces spéculaires non  $\perp$  à axe optique
- Inspection sur des surfaces réfléchissantes planes



### ■ Eclairage par sphère intégration

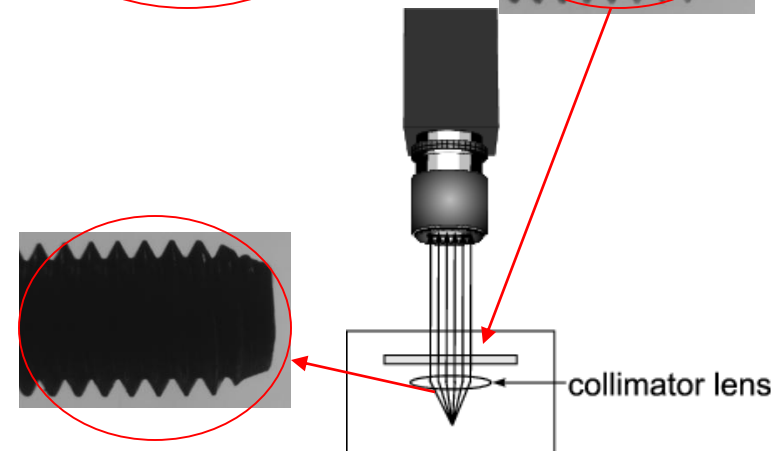
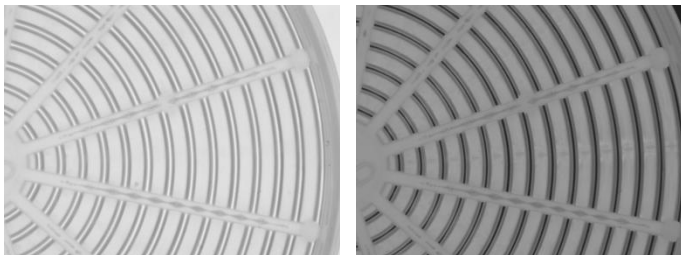
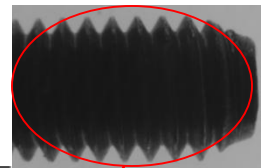
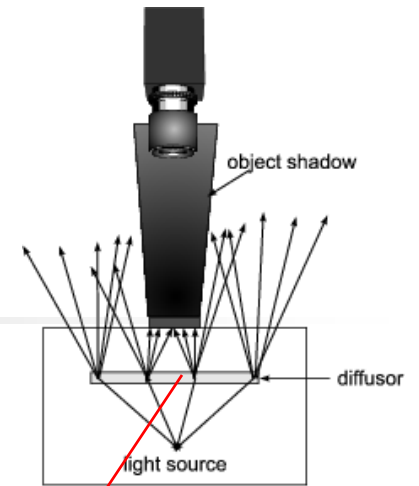
- Uniformisation de la réflexion d'un objet
- Lecture de texte sur surface réfléchissante non plane





# Stratégies d'éclairage

- Diascopie :
  - Ombres chinoises
  - Eclairage diffus
  - Eclairage directionnel
  - Eclairage polarisant







# Stratégies d'éclairage

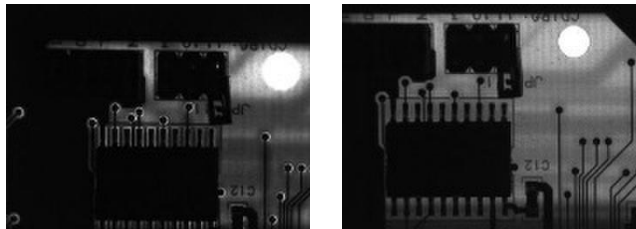
- Eclairage dans le non visible
  - Eclairage par UV



*Mise en évidence  
du nylon dans un  
polymère*

*Eclairage NUV, caméras N&B et couleur*

- Eclairage dans NIR



*Mise en évidence  
d'un composant  
électronique*

*Eclairage rouge et NIR ("back-light")*



## Plan du cours (12 h C/TD et 18h TP)

1. Colorimétrie (0.5h)
2. Acquisition des images (3h)
3. Techniques d'éclairage (0.5h)
4. Restauration des images par des exemples (3h)
5. Inspection optique par des exemples (1h)



# Restauration des images

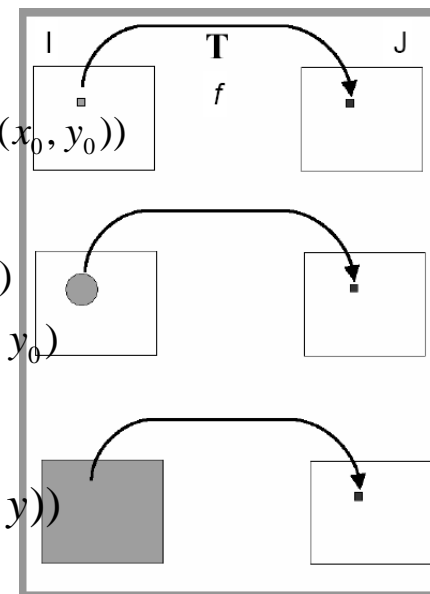
- But : réduire, voire éliminer les dégradations introduites par l'acquisition
  - Comment faire ?
    - Opérations entre images
    - Méthodes ponctuelles
    - Méthodes locales ou filtres
    - Méthodes globales
- ➔ Transfo. de Fourier

$$J(x_0, y_0) = f(I(x_0, y_0))$$

$$J(x_0, y_0) = f(I(V))$$

$V$  voisinage de  $(x_0, y_0)$

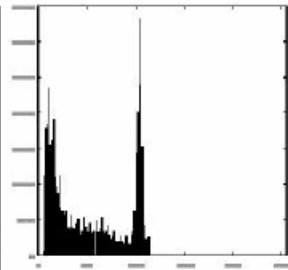
$$J(x_0, y_0) = f(I(x, y))$$



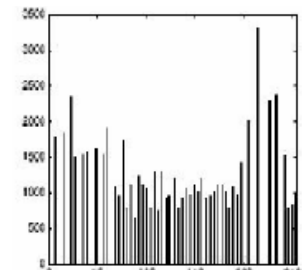
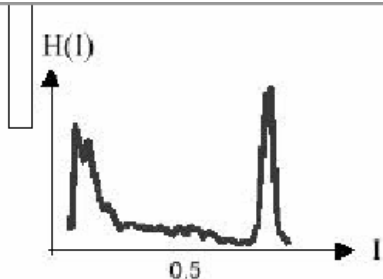
# Méthodes ponctuelles

- Principe : transformation d'un niveau  $I(x,y)$  en  $O(x,y)$  indépendamment du voisinage
- Exemple : étirement de la dynamique

$$\text{si } I(x,y) \in [g_{\min}, g_{\max}], O(x,y) = \frac{255}{g_{\max} - g_{\min}} \cdot (I(x,y) - g_{\min})$$



git Hel-Or, 1999





# Méthodes ponctuelles

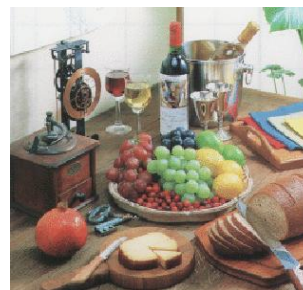
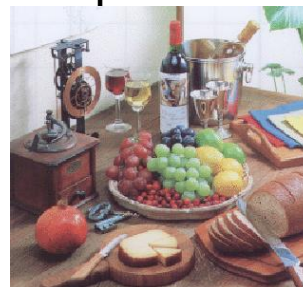
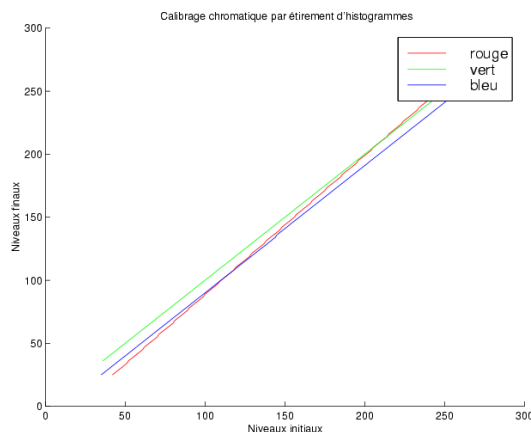


mire Macbeth

- Calibrage chromatique
  - But : corriger les aberrations chromatiques dues à :
    - Nature spectrale de l'illuminant
    - Sensibilité du capteur variable suivant la longueur d'onde
    - Transmissivité des filtres (NIR, polarisant, etc.)
    - Balance des blancs « software »
  - Démarche n° 1 : analyse de zones achromes
    - Quantifier les couleurs à partir de gris de référence (mire de Macbeth)
    - Calculer trois LUTs R,V,B à partir des différences observées sur zones ou pixels achromes

# Méthodes ponctuelles

- Calibrage chromatique
  - Démarche n° 2 : étirement d'histogrammes
    - Calcul des trois histogrammes sur l'image ou zones associées
    - Sélection de l'histogramme ayant la plus grande dynamique (référence)
    - Normalisation des histogrammes à partir de cette référence



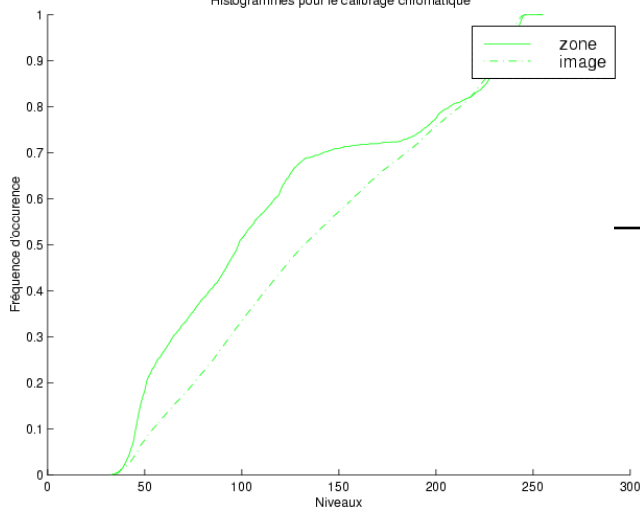
# Méthodes ponctuelles

## ■ Calibrage chromatique

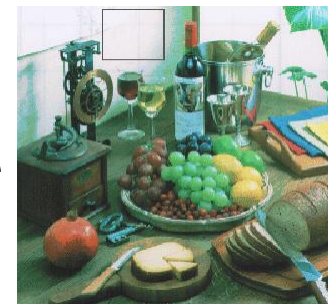
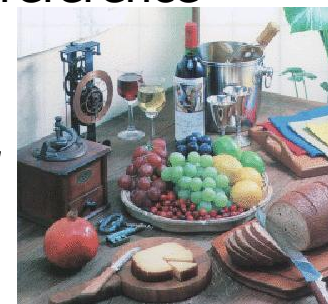
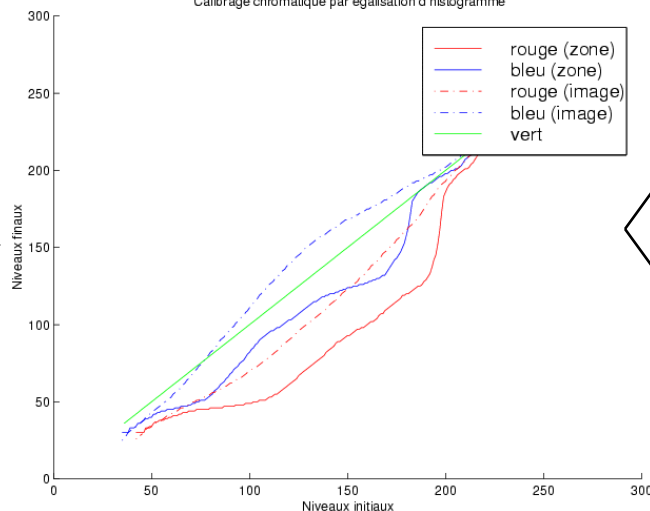
### ■ Démarche n° 3 : égalisation d'histogrammes

- Principe similaire
- Égalisation des deux composantes à partir de la référence – pas de loi mathématique...

Histogrammes pour le calibrage chromatique



Calibrage chromatique par égalisation d'histogramme



Dominante verte...

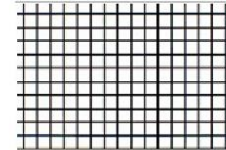
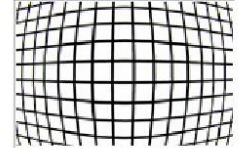
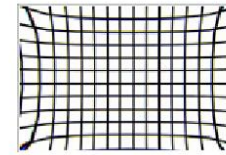


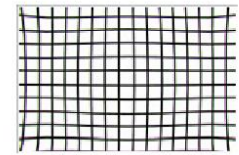
image originale



distorsion en barillet



distorsion en coussinet



distorsion complexe

# Méthodes ponctuelles

## ■ Correction géométrique

- But : modéliser puis corriger les distorsion optiques – Deux étapes :
  - Appariements et identification de la transfo. géométrique entre image originale et image dégradée
 
$$\begin{cases} x' = r(x, y) \\ y' = s(x, y) \end{cases}$$
  - Reconstruction de l'image originale par interpolation des niveaux
- Appariements entre points de contrôle des images déformée / originale  $[(x, y)_i \Rightarrow (x', y')_i]$
- Estimation des paramètres du modèle :

$$\begin{cases} r(x, y) = a_1.x + a_2.y + a_3.xy + a_4 \\ s(x, y) = b_1.x + b_2.y + b_3.xy + b_4 \end{cases} \quad E = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ x'_i - r(x_i, y_i) \right]^2 + \left[ y'_i - s(x_i, y_i) \right]^2 \right\}$$

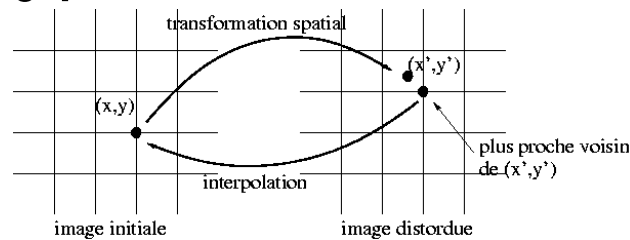




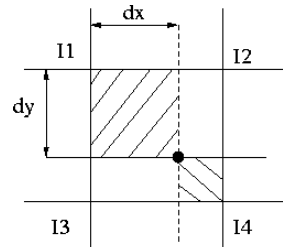
## Méthodes ponctuelles

### ■ Interpolation des niveaux (coordonnées non entières)

#### ■ Ordre 0 :



#### ■ Bilineaire :



$$I = I1.(1-dx).(1-dy) + I2.dx.(1-dy) + I3.(1-dx).dy + I4.dx.dy$$

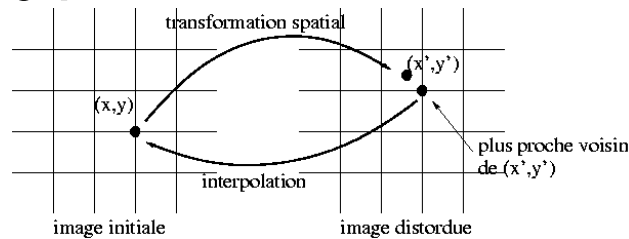




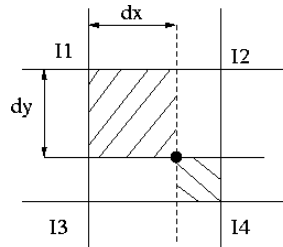
# Méthodes ponctuelles

## ■ Interpolation des niveaux (coordonnées non entières)

### ■ Ordre 0 :



### ■ Bilineaire :



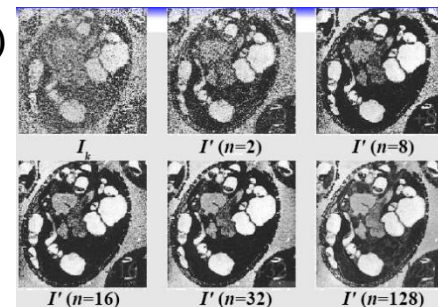
$$I = I1.(1-dx).(1-dy) + I2.dx.(1-dy) + I3.(1-dx).dy + I4.dx.dy$$



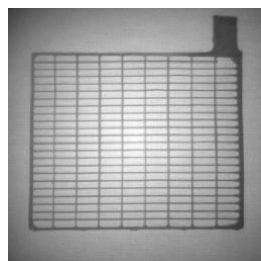


## Opérations arithmétiques entre images

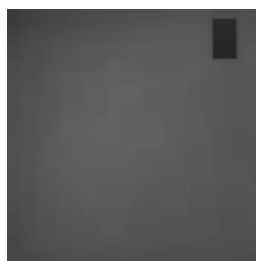
- Combinaison d'images :  $O(x, y) = f(I_1(x, y), \dots, I_n(x, y))$
- Addition d'images :  $O(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i(x, y)$



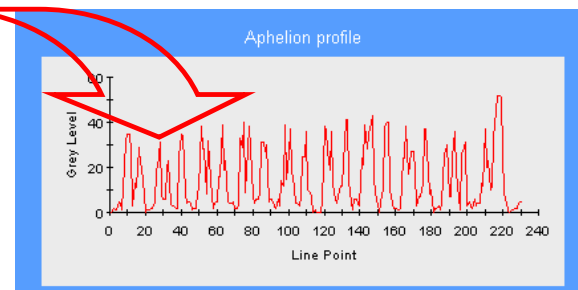
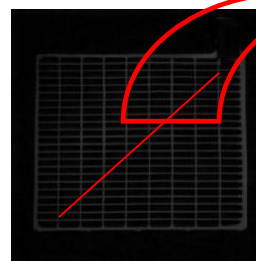
- Soustraction d'images pour correction de vignettage



—



=





# Méthodes globales

## ■ Formalisme :

si  $b$  négligeable et  $\hat{f}$  estimée de  $f$  :

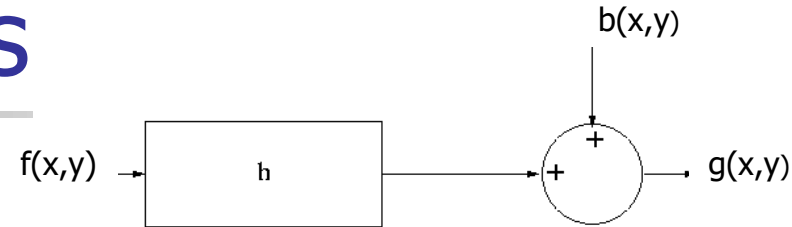
sous forme matricielle :  $\hat{\underline{F}} = \underline{H}^{-1} \cdot \underline{G}$  ( $\underline{H}$  matrice carrée)

$$\hat{\underline{F}} = (\underline{H}^T \cdot \underline{H})^{-1} \cdot \underline{H}^T \cdot \underline{G} \quad (\underline{H} \text{ matrice non carré})$$

Par Fourier :  $\hat{F}(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)}$ ,  $F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-j.2\pi(u.x + v.y)] f(x, y).dxdy$

si  $b$  pris en compte :

$$G(u, v) = H(u, v).F(u, v) + B(u, v)$$



$$g(x,y) = h * f(x,y) + n(x,y)$$

## ■ Application à la correction d'un bougé :

- Image dégradée  $g(x,y)$  formalisée par :  $g(x, y) = \int_0^T f(x - v_x.t, y - v_y.t).dt$
- Calcul de TF de  $g(x,y)$  :  $G(u, v) = F(u, v) \cdot \int_0^T e^{-2j\pi(u.v_x.t + v.v_y.t)} dt$
- Caractérisation de la dégradation  $H$  :

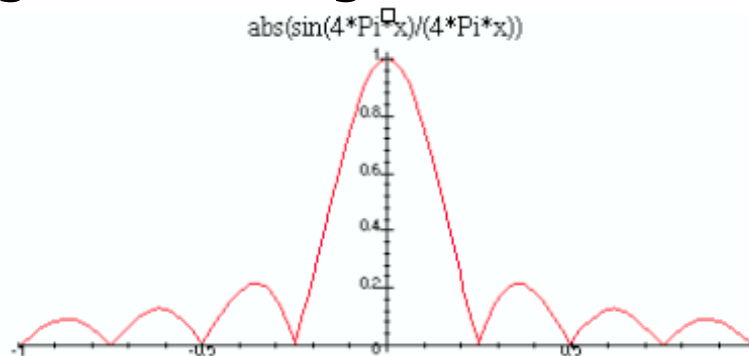
$$H(u, v) = T \cdot e^{-j\pi.u.d} \cdot \frac{\sin \pi.u.d}{\pi.u.d}$$



# Méthodes globales

## ■ Application à la corrigé d'un bougé :

### ■ Allure de $H(u,v)$ :



### ■ Démarche :

❶ évaluer  $G(u,v)$

❷ mesurer la distance  $d$  (entre deux zéros de  $G(u,v)$ )

❸ évaluer  $H(u,v)$

❹ calculer  $\hat{F}(u,v) = \frac{G(u,v)}{H(u,v)}$

❺ calculer

$$\hat{f}(x,y) = TF^{-1}(\hat{F}(u,v))$$





# Méthodes globales

## ■ Restauration interactive

- But : tirer partie de l'intuition humaine et de la souplesse des ordinateurs - contrôle interactif du processus de restauration
- Exemple de correction d'une interférence 2D sinusoïdale :

$$B(x, y) = A \cdot \sin(u_0 \cdot x + v_0 \cdot y)$$

- Calcul de la TF de l'onde :

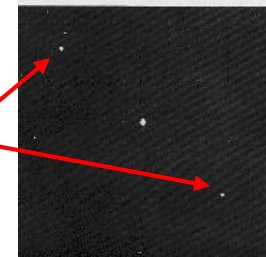
$$B(u, v) = -\frac{j \cdot A}{2} \left[ \delta\left(u - \frac{u_0}{2\pi}, v - \frac{v_0}{2\pi}\right) - \delta\left(u + \frac{u_0}{2\pi}, v + \frac{v_0}{2\pi}\right) \right]$$

$$G(u, v) = F(u, v) + B(u, v)$$

- Filtre passe-bande pour supprimer les impulsions associées



(a)



(b)



(c)



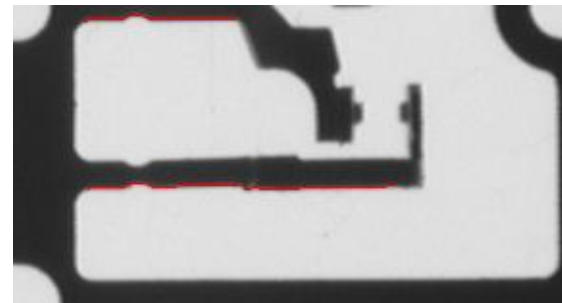
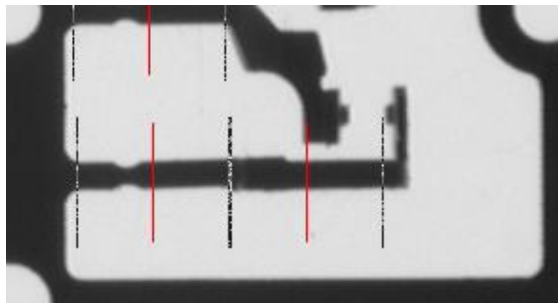
## Plan du cours (12 h C/TD et 18h TP)

1. Colorimétrie (0.5h)
2. Acquisition des images (3h)
3. Techniques d'éclairages (0.5)
4. Restauration des images par des exemples (3h)
5. Inspection optique par des exemples (1h)



# Métrologie

- But : Inspection d'une pièce métallique découpée – pré-requis : position approximative de la pièce
- Solution :
  - Eclairage diascopique, extraction des contours par lignes de recherche





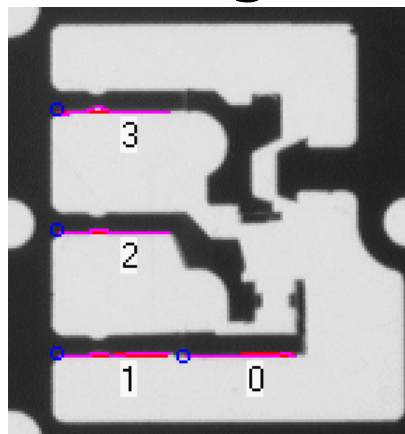
# Métrologie

## ■ Solution :

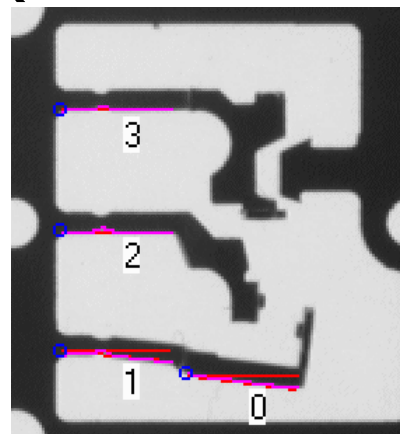
### ■ Extraction des segments associés

$$D = \sum_{i=1}^n (y_i - a.x_i - b)^2, b = \bar{y} - a.\bar{x}, a = \frac{\sum x_i.y_i - n.\bar{x}.\bar{y}}{\sum x_i^2 - n.\bar{x}^2}$$

### ■ Mesure angulaire (coeff. directeur)



Ident no.	Text	Measurement	Nom.
✓ 0	Bottom right	1.10	0.00
✓ 1	Bottom left	0.99	0.00
✓ 2	Center	-0.08	0.00
✓ 3	Top	0.52	0.00

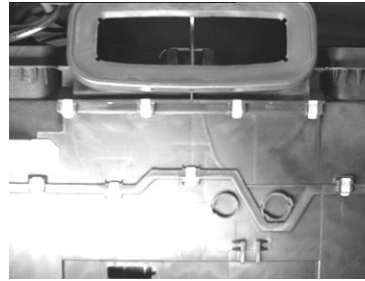


Ident no.	Text	Measurement	Nom.
✗ 0	Bottom right	-7.25	0.00
✗ 1	Bottom left	-4.89	0.00
✓ 2	Center	-0.14	0.00
✓ 3	Top	0.05	0.00



# Vérification de présence

- But : vérifier la présence de clips sur un climatiseur de voiture –pré-requis : position grossière de la pièce



- Solution :
  - plusieurs caméras avec éclairage épiscopique diffus (indirect ou diffuseur)

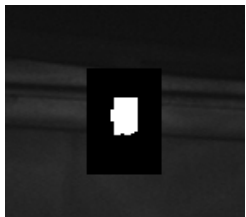
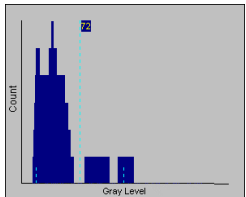
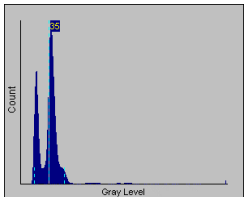
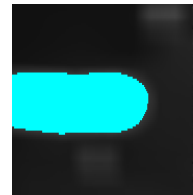
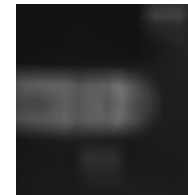




# Vérification de présence

## ■ Solution :

- Ajustement grossier de la position à partir d'une région caractéristique
- Segmentation des clips
  - Positionnement de ROIs
  - Lissage puis calcul de seuils locaux
- Décision basée sur des mesures (aire, ratio de dimension, etc.)

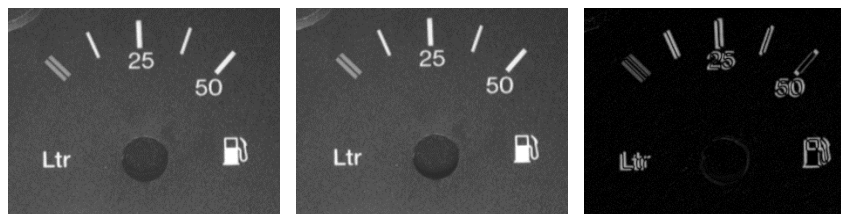




# Identification de marqueurs

- But : qualité d'impression sur une jauge à essence

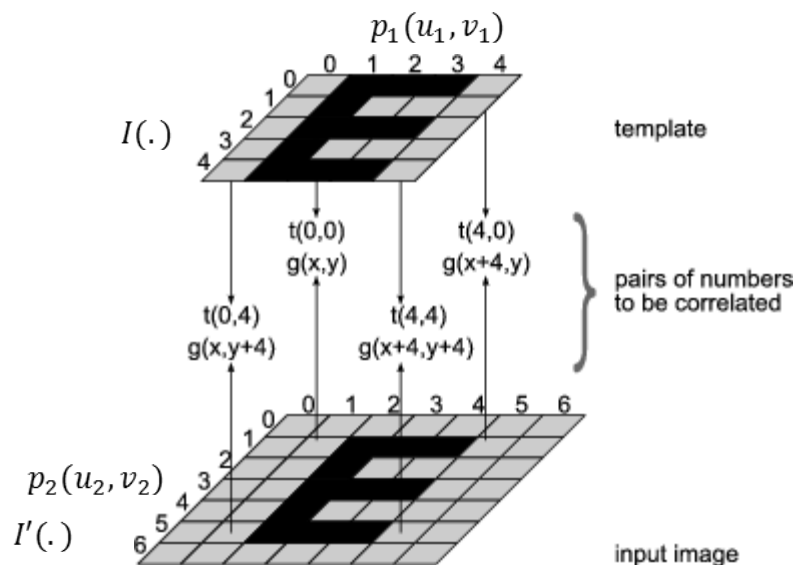
- Solution :



- Différence d'images – requiert un positionnement précis...
- Recalage grossier par « template matching » sur le trou
- Recalage fin de chaque région par « template matching »

## « Bloc matching »

- But : détecter la présence d'une forme *a priori* - Approche non ascendante...
- Mesure de similarité :



$$SSD(p_1, p_2) = \sum_{x=-M}^{+M} \sum_{y=-M}^{+M} [I(u_1 - x, v_1 - y) - I'(u_2 - x, v_2 - y)]^2$$

$$CC(p_1, p_2) = \sum_{x=-M}^{+M} \sum_{y=-M}^{+M} I(u_1 - x, v_1 - y) \cdot I'(u_2 - x, v_2 - y)$$

$$ZNCC(p_1, p_2) = \frac{\sum_{x,y} [I(u_1 - x, v_1 - y) - \bar{I}][I'(u_2 - x, v_2 - y) - \bar{I}']}{\sqrt{\sum_{x,y} [I(u_1 - x, v_1 - y) - \bar{I}]^2 \sum_{x,y} [I'(u_2 - x, v_2 - y) - \bar{I}']^2}}$$

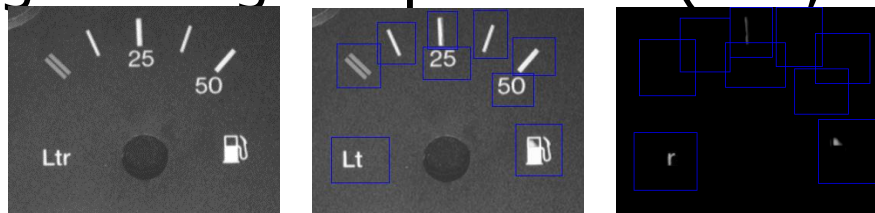
$p_1 = (u_1, v_1)^T$  apparié avec  $p_2 = (u_2, v_2)^T$ ,  $I(u, v)$  niveau en  $(u, v)$



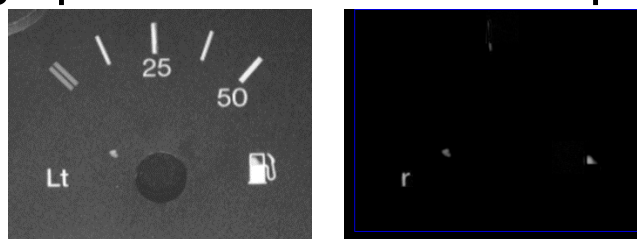
# Identification de marqueurs

## ■ Solution :

- Différence d'images – segmentation région – filtrage de régions parasites (aire, ratio)



- Traiter l'image entière pour les défauts hors ROIs
  - Division de l'image en sous régions (2x2, 3x3, etc.) à chaque itération
  - Recalage par corrélation de chaque région





# Identification de marqueurs

- But : reconnaissance de caractères sur circuit intégré (CI) – pré-requis : position grossière du CI
- Solution :
  - Eclairage rasant
  - Positionnement de ROIs pour accélérer la recherche
  - Segmentation des caractères par seuillage
  - Extraction des imageries associées

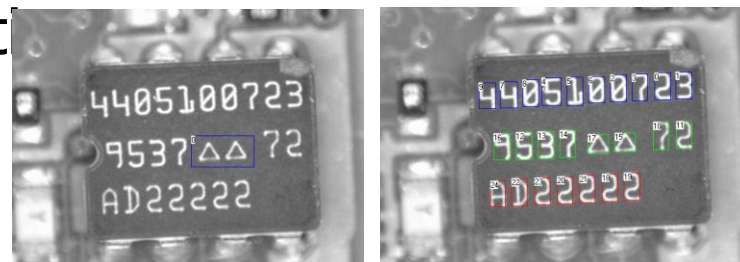
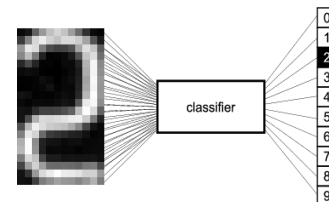
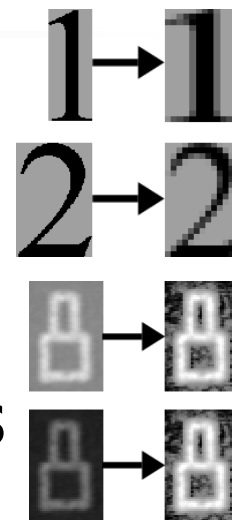


# Identification de marqueurs

## ■ Solution :

- Normalisation des imageries (taille, contraste)
- Classification par réseau de neurones
- Ajustement en position

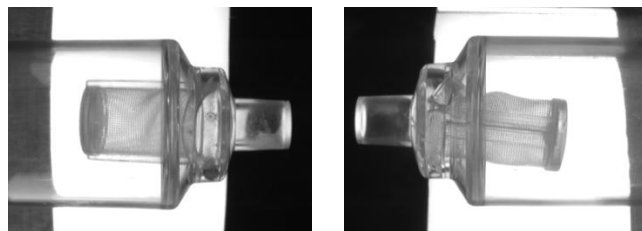
- Détection des arêtes verticales puis horizontales
- Par « *template matching* » sur les 2 triangles puis localisation relative





# Contrôles de conformité multiples

- But : inspection du filtre d'une chambre à goutte – 3 tâches :
  - longueur du filtre (T1)
  - centrage / récipient (T2)
  - diamètre du filtre à son extrémité sup. (T3)
- Solution :
  - Éclairage par l'arrière

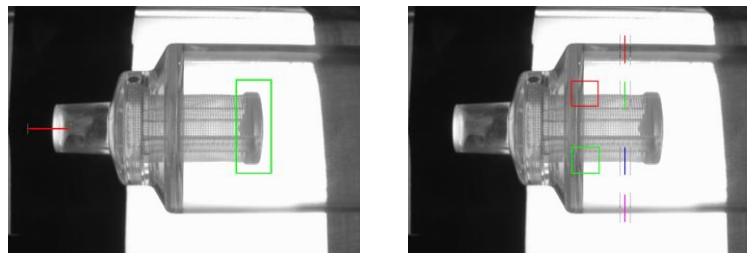
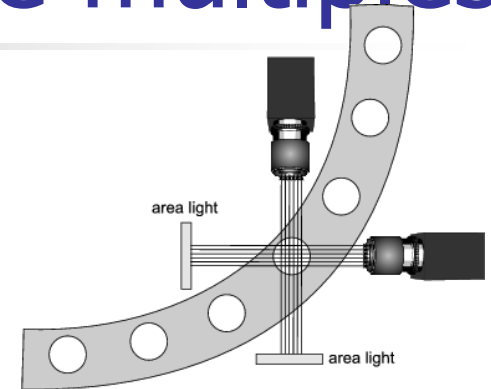




# Contrôles de conformité multiples

## ■ Solution :

- Système multi-caméras
- T1 (longueur du filtre) :
  - Ligne de recherche pour extraction extrémité sup. du goulot
  - Segmentation région pour extraction extraction inf. du goulot
- T2 (centrage) :
  - 4 lignes de recherche dédiées pour calcul de contours



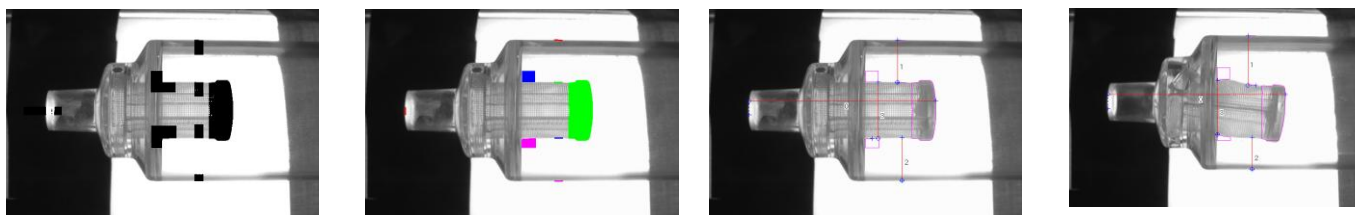




# Contrôles de conformité multiples

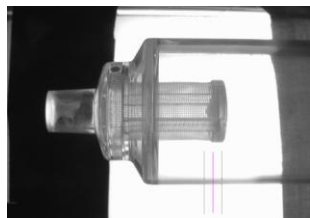
## ■ Solution :

- T3 (diamètre) :
  - Segmentation de régions par positionnement de ROIs
- Simultanéité des tâches



## ■ Ajustement de la position :

- Pièces non rigoureusement verticales sur le convoyeur – comment positionner les ROIs ?
- Recalage / paroi inférieure (ligne de recherche)





# Bibliographie

- Les secrets de l'image vidéo. P.Bellaïche. Edition EYROLLES
- « Industrial image processing ». C.Demant, B.Streicher-Abel, P.Waszkewitz. Edition SPRINGER
- « Handbook of machine vision ». A.Hornberg. Edition WILEY
- « Digital image processing ». R.C.Gonzalez et R.E.Woods. Edition Addison Wesley

**EXAMEN ECRIT : FEUILLE A4 RECTO VERSO**