



M2 AURO

UE Robotique industrielle avancée

Enseignement « Vision industrielle »

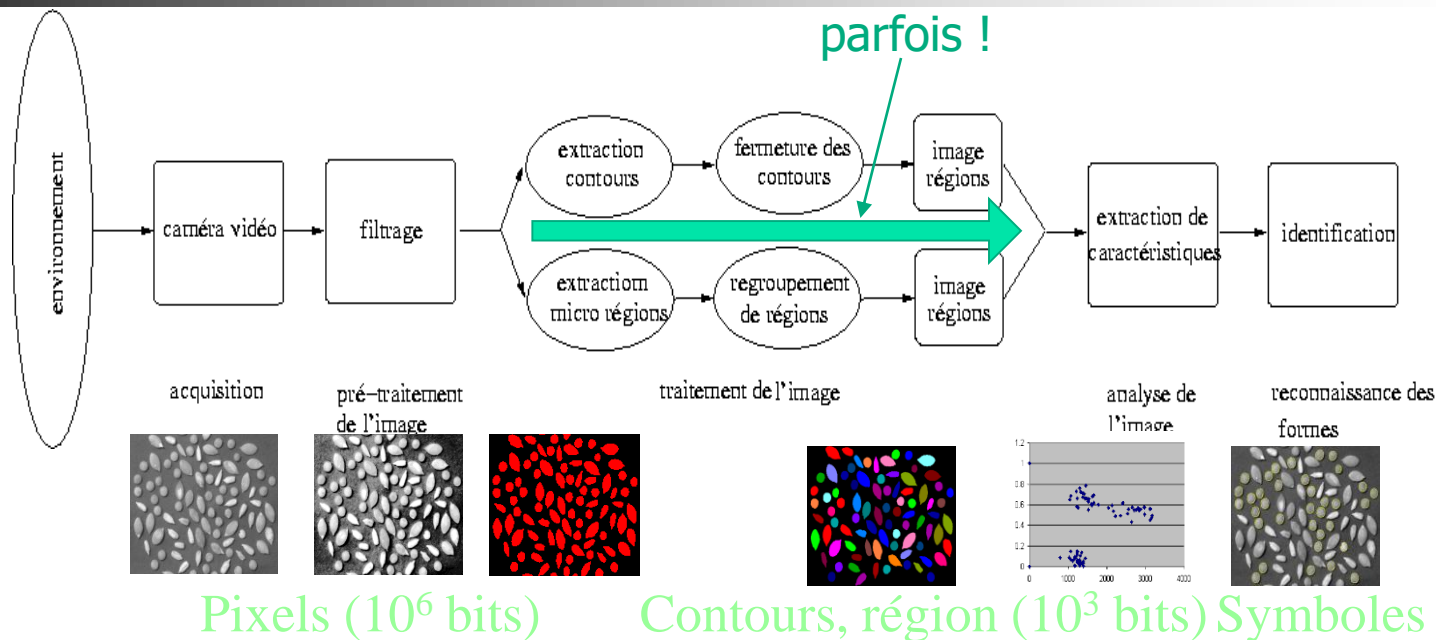


Plan du cours (10h C/TD, 6h TP)

1. Introduction, colorimétrie (1h)
2. Acquisition des images (3h)
3. Contrôle optique de conformité (5h)
4. Correction annale (1h)



Traitement et niveaux de représentation



Une image : pour rappel...

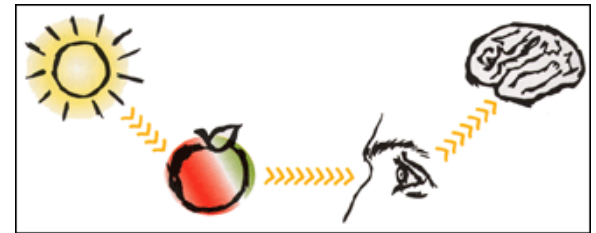
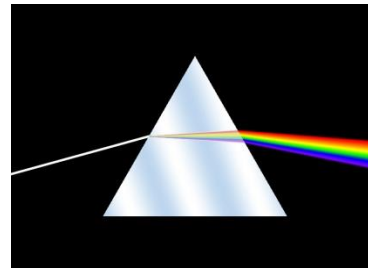
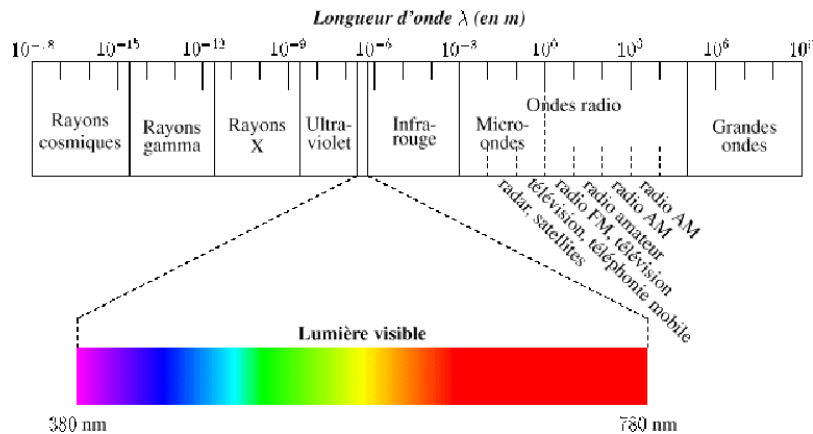
Image numérique :

- Forme discrète d'un phénomène continu bidimensionnel – tableau de pixels
- L'information : caractéristique de l'intensité lumineuse (couleur ou niveaux de gris)
 $I : [0, L-1] \times [0, C-1] \Rightarrow [0, 2^Q - 1]$: résolution $L \times C$, nombre p de plans de profondeur respective Q
- Exemples
 - Image binaire $\Rightarrow (p, Q) = (1, 1)$
 - Image en niveaux de gris $\Rightarrow p = 1$ et $Q = 8$
 - Image couleur $\Rightarrow p = 3$ et $Q = 8$



Colorimétrie

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

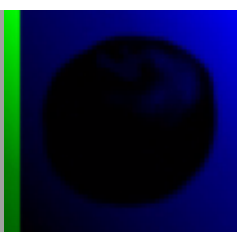
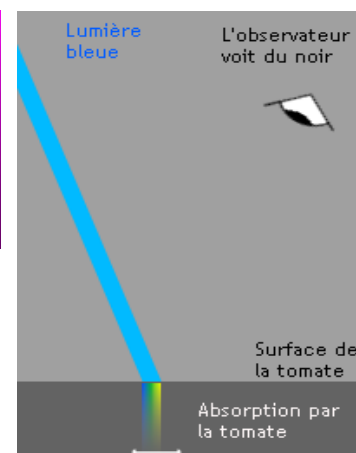
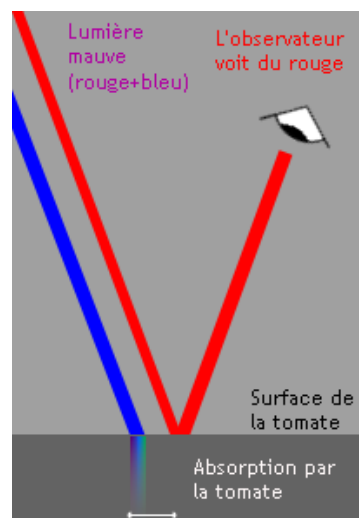
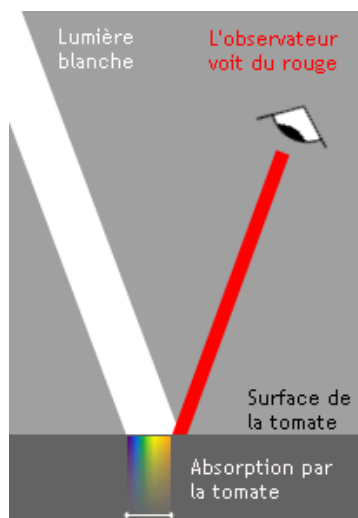


- Lumière blanche = somme de toutes les couleurs du spectre
- Couleur... une grandeur subjective



Colorimétrie

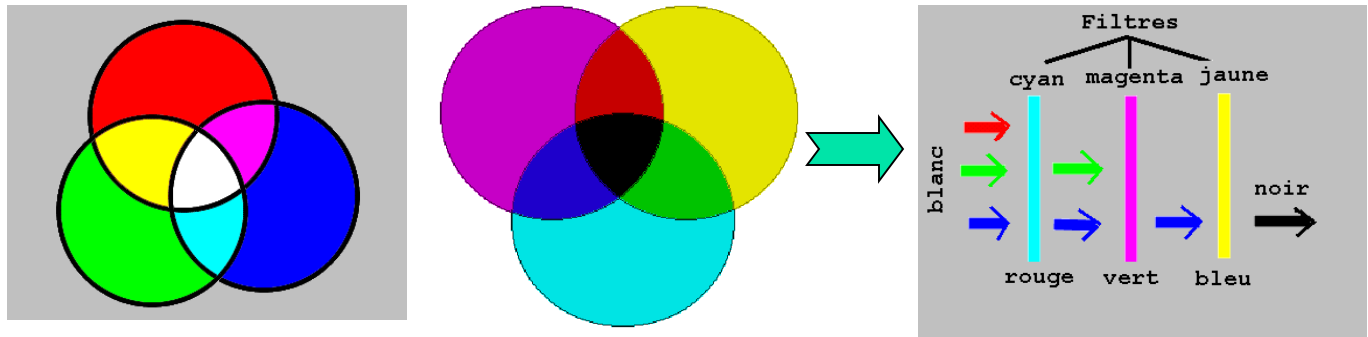
- Couleur d'objet liée à :
 - Absorption sélective de certaines longueurs d'onde et réflexion des autres
 - Constitution de la lumière





Colorimétrie

- Synthèse additive et soustractive

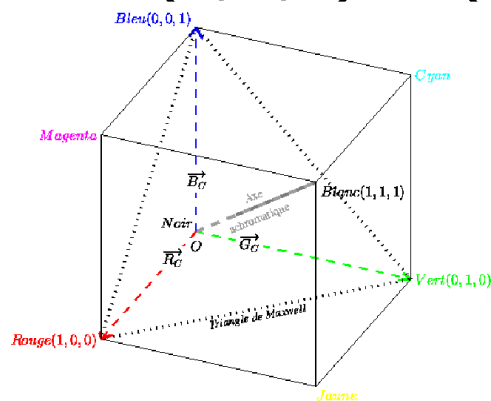


- La couleur, une grandeur vectorielle...
- Nombreux espaces colorimétriques
 - Systèmes de primaires
 - Systèmes perceptuels
 - Systèmes d'axes indépendants



Colorimétrie

- Systèmes de primaires
 - Espaces (R,G,B) et (r,g,b) normalisés



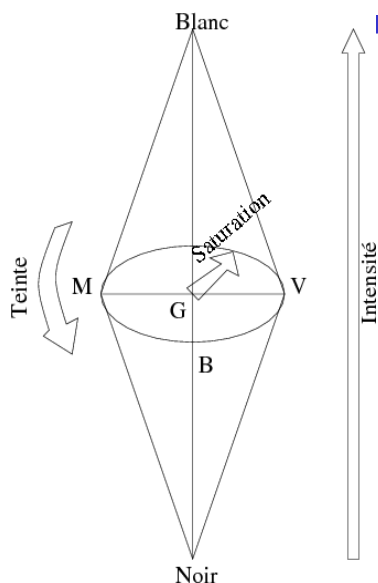
$$\begin{cases} r = \frac{R}{R + G + B} \\ g = \frac{G}{R + G + B} \\ b = \frac{B}{R + G + B} \end{cases}$$

- Fonction des primaires et blanc de référence : CIE (R, G, B), « Federal Communications Commission » (R_f, G_f, B_f) « Europ. Broadcasting Union » (R_e, G_e, B_e)

Colorimétrie

■ Systèmes perceptuels

- Nombreux systèmes : ITS, HSV, ISH, HSL, etc.



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

- Issus directement des primaires RGB

Segmentation HSV (Ex.)

- On souhaite isoler la fleur jaune?

Image dont l'on veut segmenter la fleur jaune





Segmentation HSV (Ex.)

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

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





Segmentation HSV (Ex.)

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

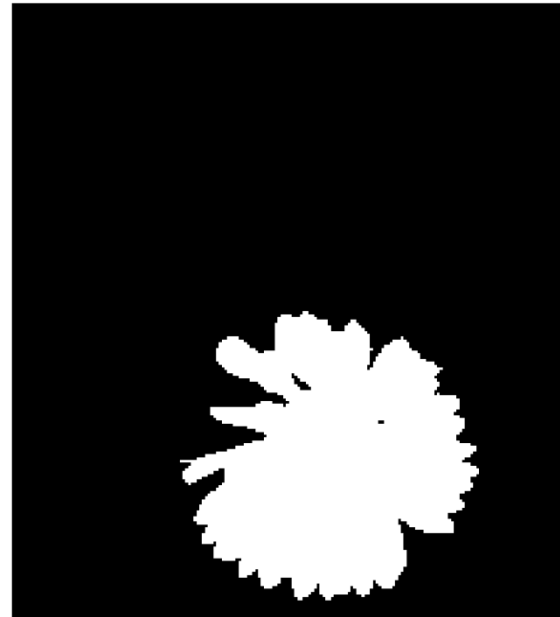
Pixels pour lesquels $S > 0.75$



Segmentation HSV (Ex.)

- Identification des pixels aux deux images précédentes

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

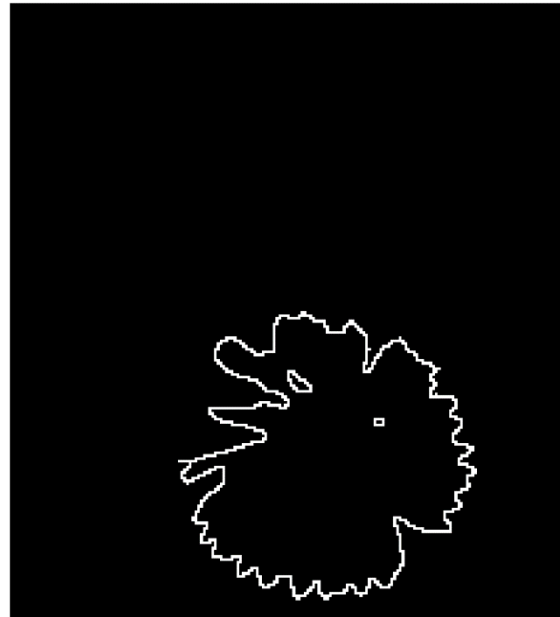




Segmentation HSV (Ex.)

- Identification du contour de la région isolée précédemment

périmètre de la fleur jaune





Segmentation HSV (Ex.)

- Superposition du contour à l'image initiale

Résultat de la segmentation



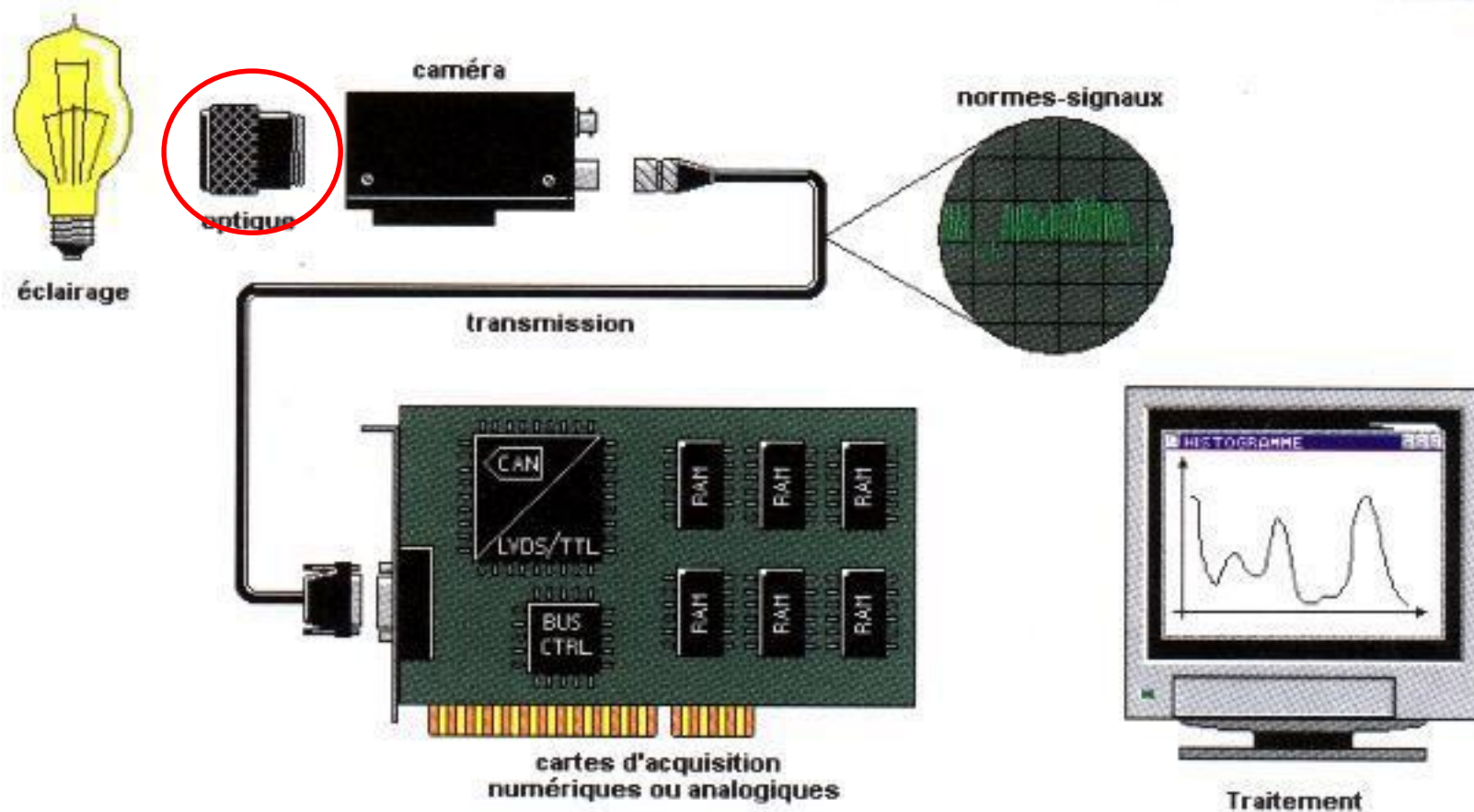


Plan du cours (10h C/TD, 6h TP)

1. Introduction, colorimétrie (1h)
2. Acquisition des images (3h)
3. Contrôle optique de conformité (5h)
4. Correction annale (1h)



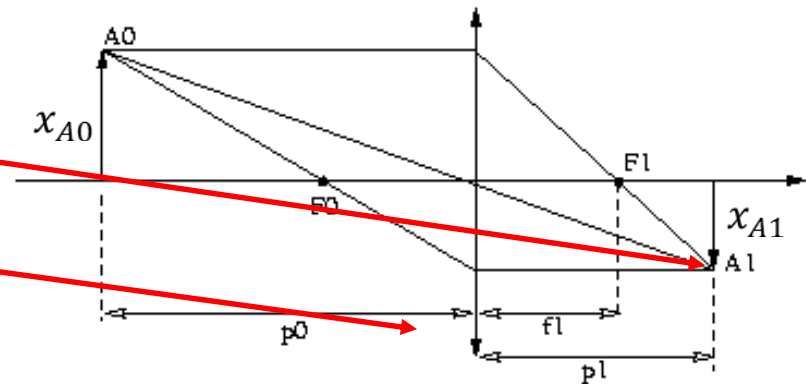
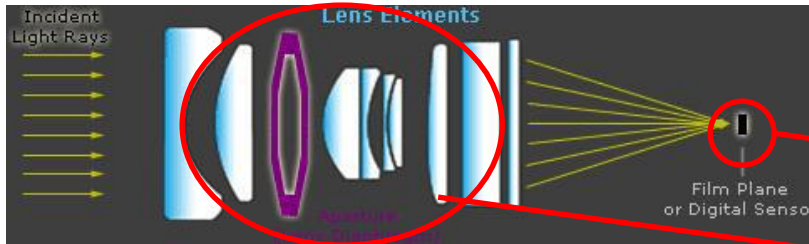
Optique de caméra





Optique de caméra

■ Modèle d'optique mince

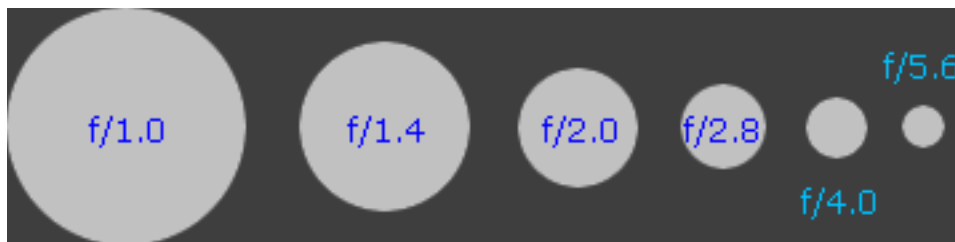


■ Définitions

- 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 : $\frac{1}{f_1} = \frac{1}{p_0} + \frac{1}{p_1}$

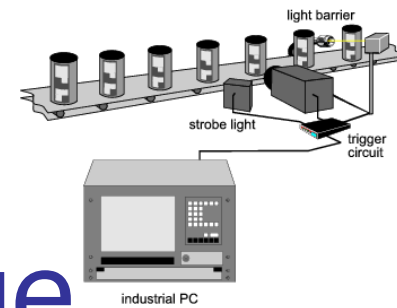
Paramètres d'une optique

- 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)



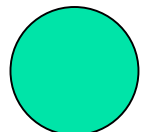
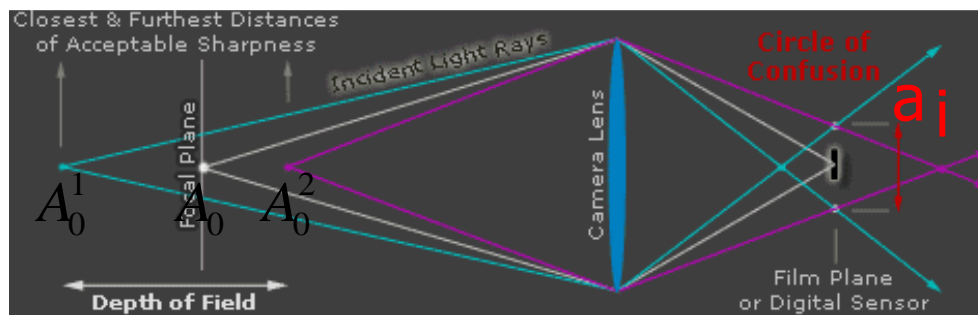
- Le « shutter » ou temps d'exposition





Paramètres d'une optique

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



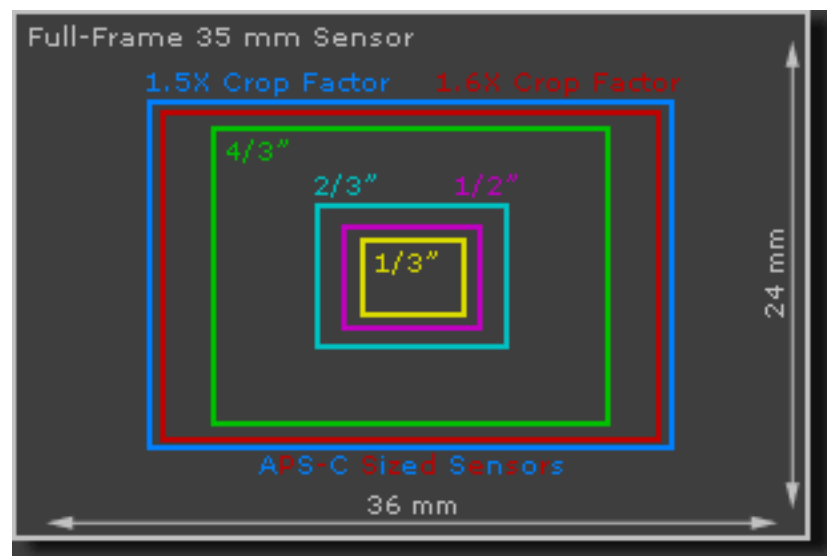


Paramètres d'une optique

■ Angle de champ

- Défini par 2θ 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



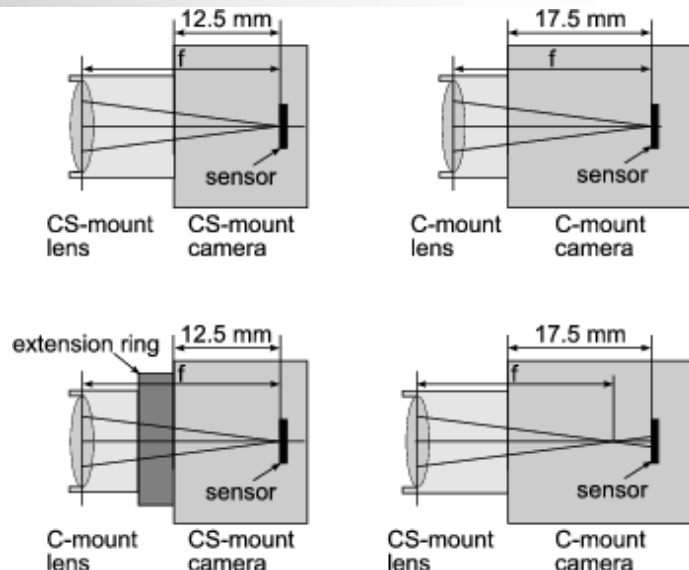
Optique : comment choisir ?

■ Dictée par l'application...

- Focale
- Ouverture min et max
- Monture C ou CS
- Bague allonge /adaptation

■ Exercices

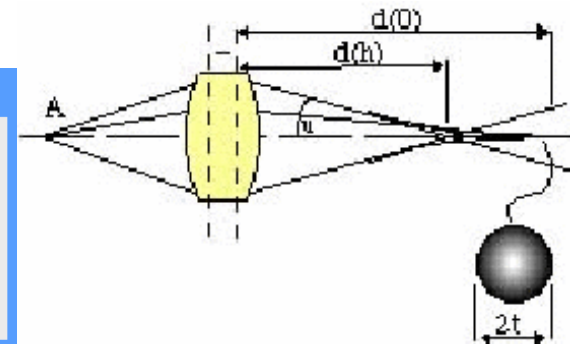
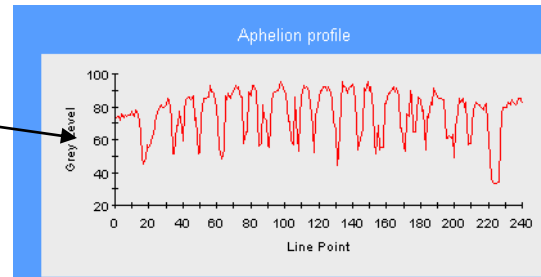
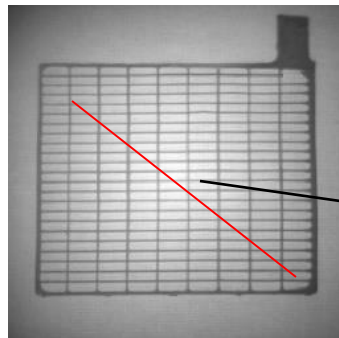
- Calculer la focale pour le cas suivant : la taille de l'objet visualisé est assimilé à un segment de droite de 40 cm et le capteur est à 1m; On choisit une rétine 2/3 ''.
- Calculer la focale pour le cas suivant : angle de vue de 90° et un objet situé à 1m, rétine de 2/3''





Aberrations optiques

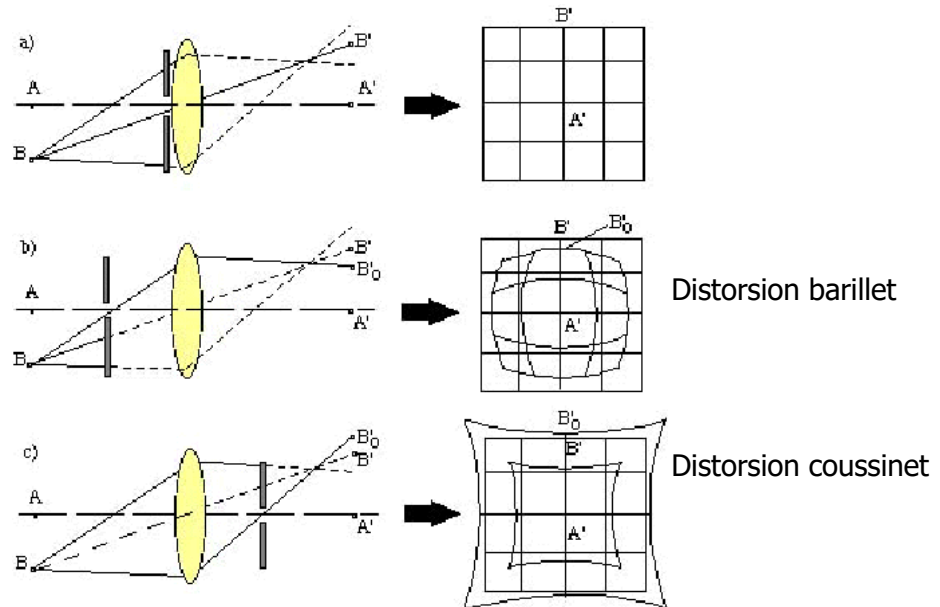
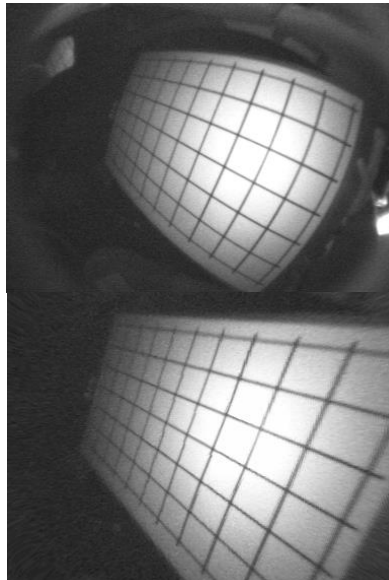
- Aberrations radiométriques
 - Vignettage : éclairage non uniforme dans le plan image – dû à l'occultation des rayons marginaux
- Aberrations géométriques
 - Coma, astigmatisme, courbure de champ, **sphérique**, **distorsion**
 - Sphérique = défocalisation sur les bords de l'image – convergence différente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

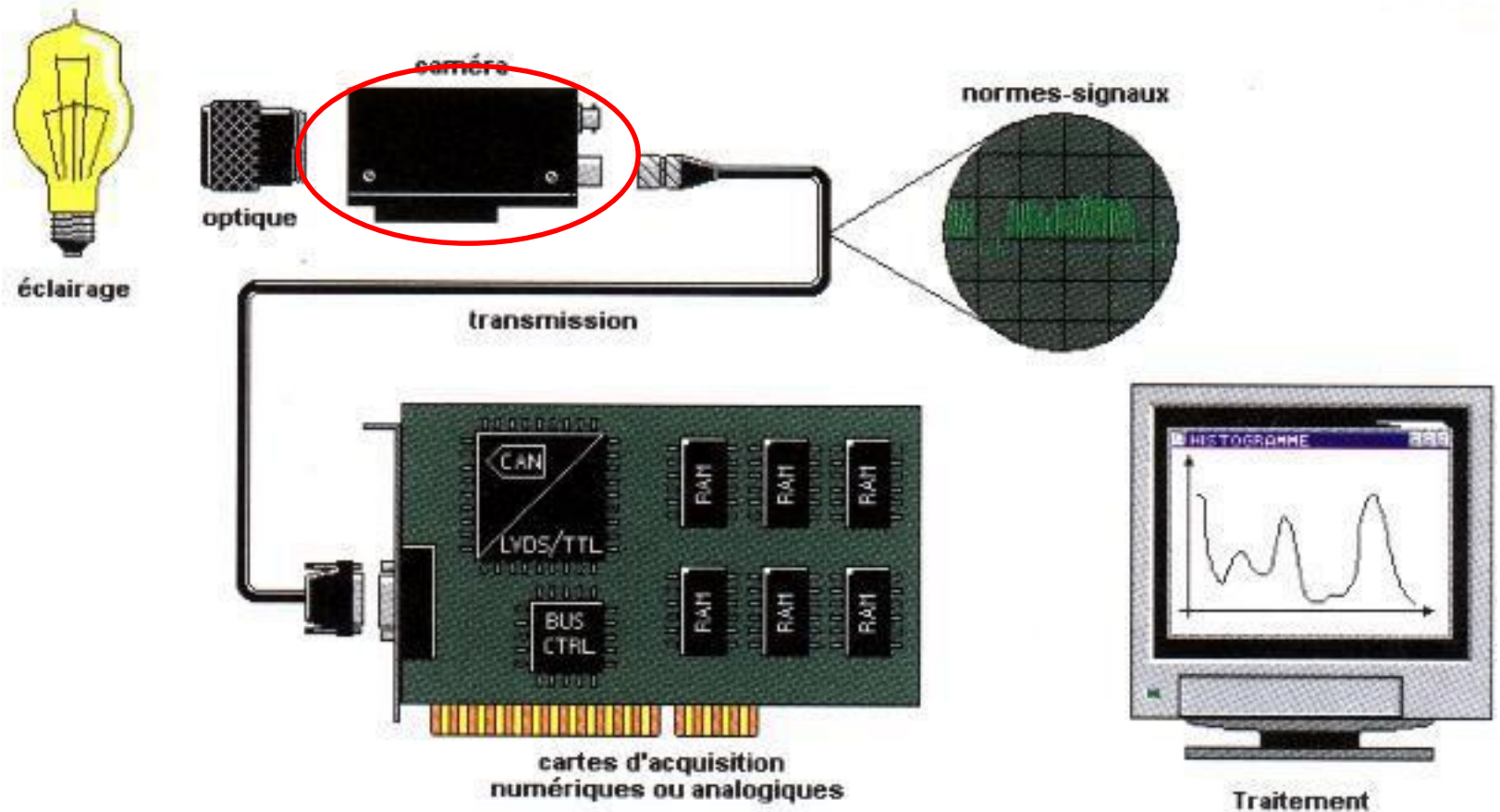


Distorsion barillet

Distorsion coussinet

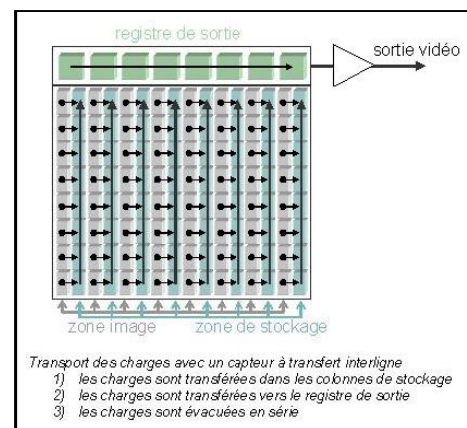
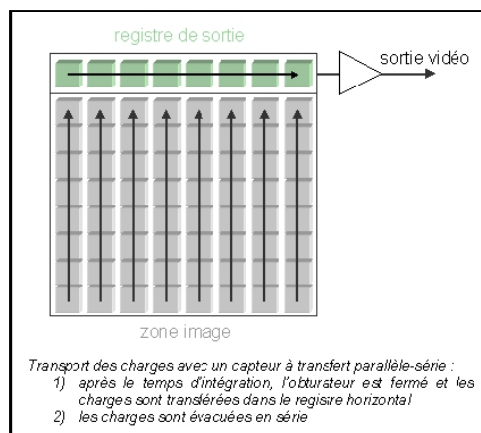
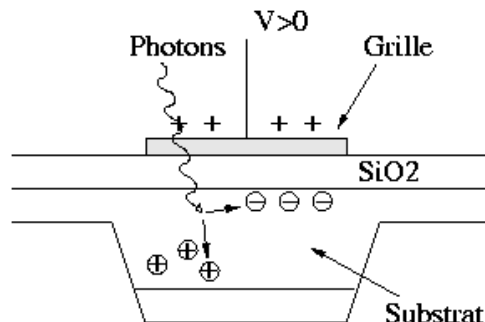


Capteurs vidéo



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

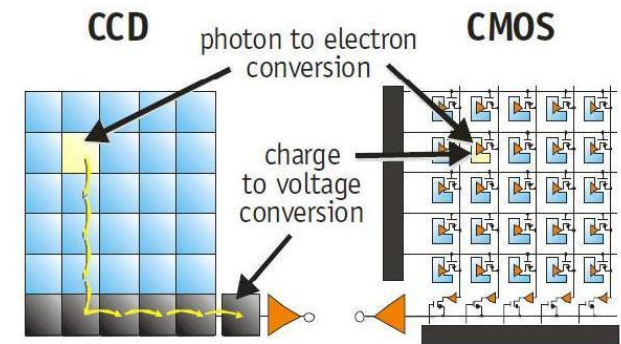
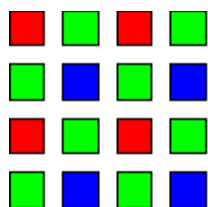


Figure 3. CCDs move photogenerated charge from pixel to pixel and convert it to voltage at an output node; CMOS imagers convert charge to voltage inside each pixel.

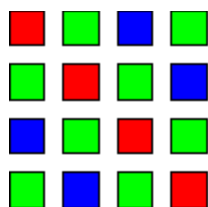


Caméra couleur

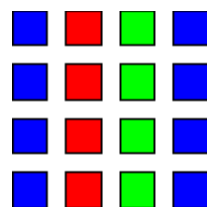
- 2 technologies sur le marché
- Solution #1: un seul capteur et des filtres (mono capteur)
 - Sensibilité différentes des photo-éléments par des mosaïques de filtres
 - « demosaicing » par plus proches voisins, bilinéaire, etc.
 - Très utilisée...



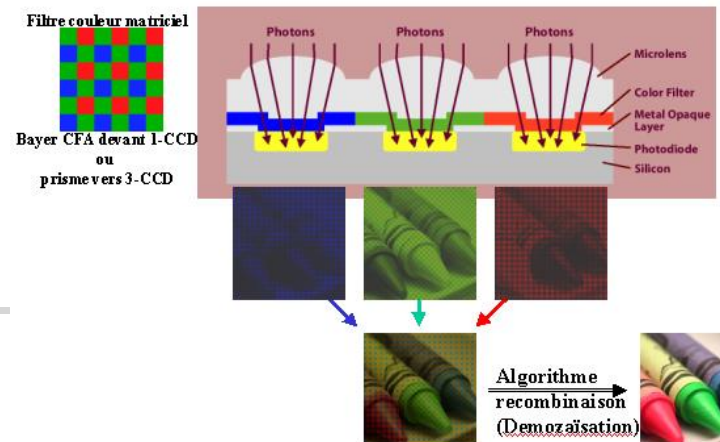
Mosaïque Bayer



Mosaïque en diagonale



Mosaïque par colonnes



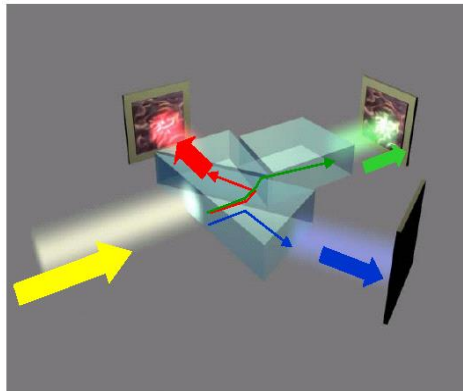
$$h_G(x) = \begin{cases} \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & x \in \{x_R, x_B\}, \\ \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & x \in x_G, \\ \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} &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

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

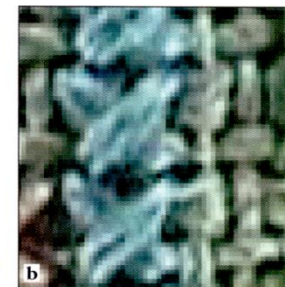


Caméra couleur

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



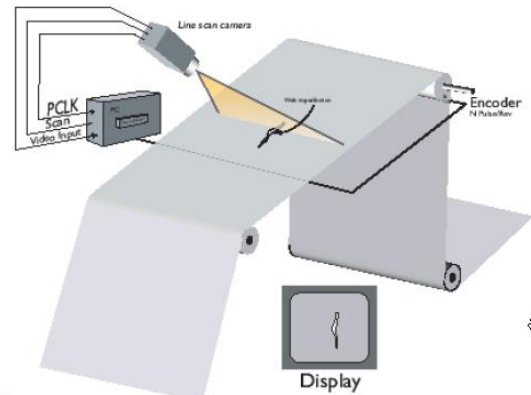
Tri-captur



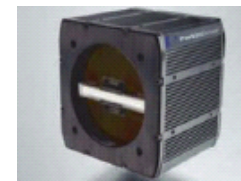
Mono capteur



Caméra linéaire



- Une seule barrette de pixels



- 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 prédéfini (contrôle sur laminoir)
 - En continu : fonctionnement cyclique (inspection de textile ou tissu)

Caméra infra rouge

- Caméras classiques pour le proche IR [700-1100 nm]
- Caméras spécifiques pour réception des émissions IR [2, 15 μm]
- Détection de température / longueur d'onde
 - [8, 12 μm] pour 30° à 200°
 - [3, 5 μm] pour 250° à 400°
- Faible résolution, saturation
- Applications : isolation de bâtiments, militaire, surveillance de forêts



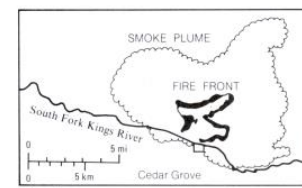
Figure 5-17 Heat loss survey of Brookhaven National Laboratories, Long Island, New York. Localities are explained in the text. Courtesy: Diodata Enterprises, Inc.



A. Visible image.



B. Thermal IR image.



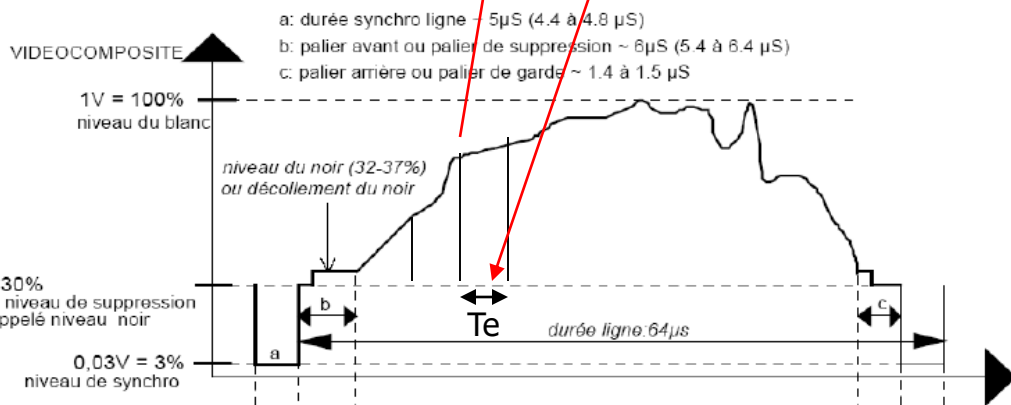
C. Location map.

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

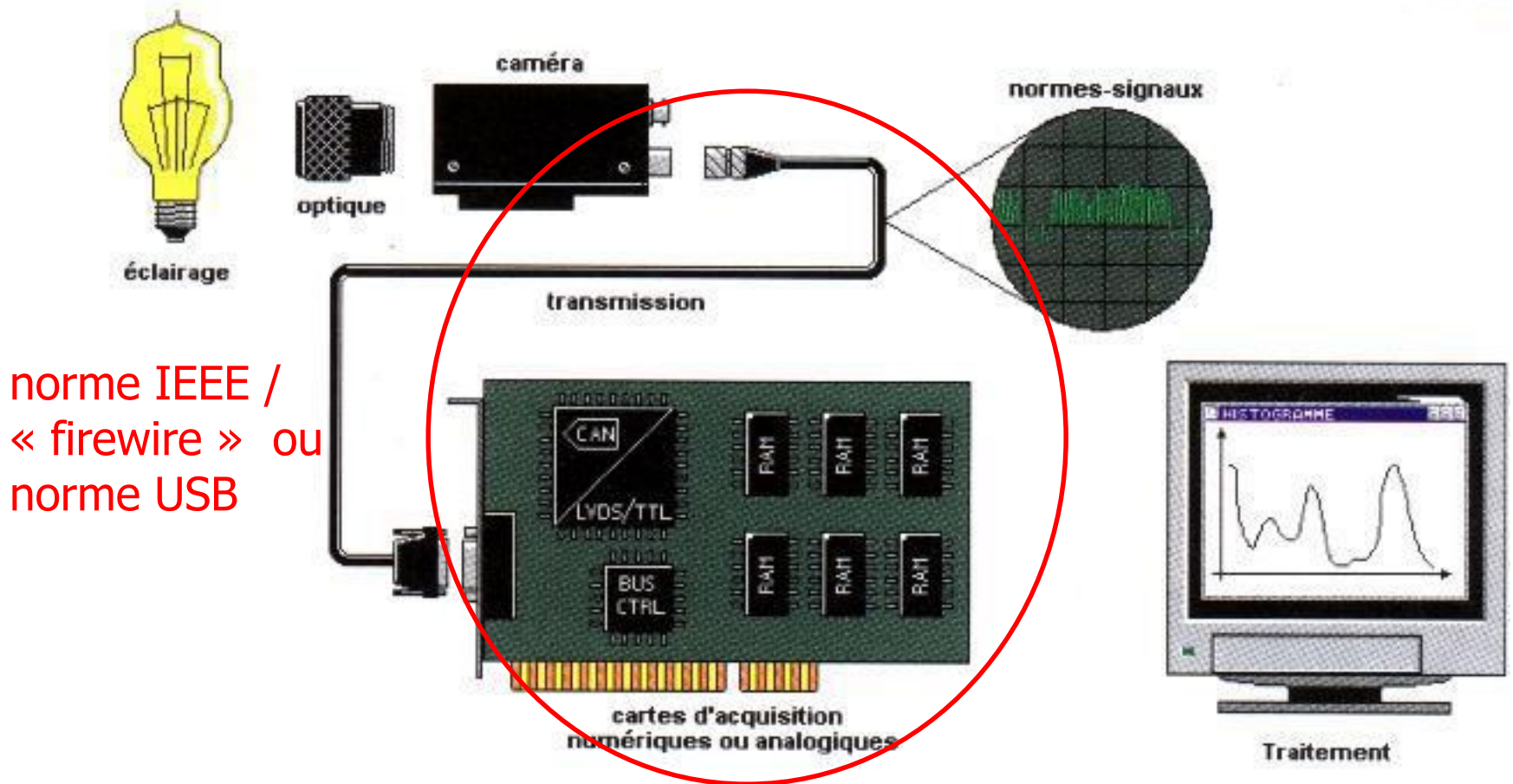
étape 3



	x = 58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
y =															
41	210	209	204	202	197	247	143	71	64	80	84	54	54	57	58
42	206	196	203	197	195	210	207	56	63	58	53	53	61	62	51
43	201	207	192	201	198	213	156	69	65	57	55	52	53	60	50
44	216	206	211	193	202	207	208	57	69	60	55	77	49	62	61
45	221	206	211	194	196	197	220	56	63	60	55	46	97	58	106
46	209	214	224	199	194	193	204	173	64	60	59	51	62	56	48
47	204	212	213	208	191	190	191	214	60	62	66	76	51	49	55
48	214	215	215	207	208	180	172	188	69	72	55	49	56	52	56
49	209	205	214	205	204	196	187	196	86	62	66	87	57	60	48
50	208	209	205	203	202	186	174	185	149	71	63	55	55	45	56
51	207	210	211	199	217	194	183	177	209	90	62	64	52	93	52
52	208	205	209	209	197	194	183	187	187	239	58	68	61	51	56
53	204	206	203	209	195	203	188	185	183	221	75	61	58	60	60
54	200	203	199	236	188	197	183	190	183	196	122	63	58	64	66
55	205	210	202	203	199	197	196	181	173	186	105	62	57	64	63



Transmission de l'image



norme IEEE /
« firewire » ou
norme USB



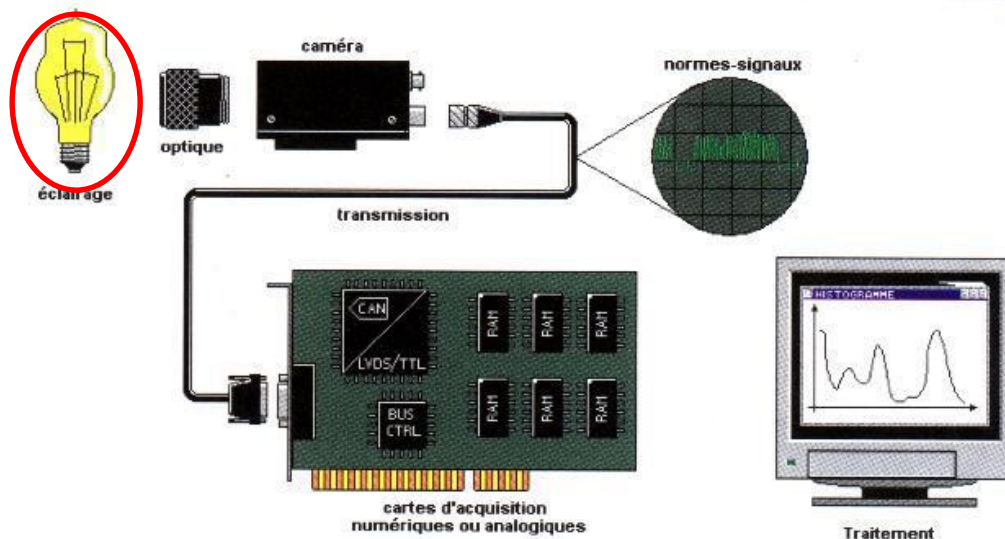
Exercices

- 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.
- Réalisation d'un système de mesure 3D pour petits objets : la caméra a les caractéristiques suivantes : focale de 25 mm, rétine $1/2''$, 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.



Techniques d'éclairage

- 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

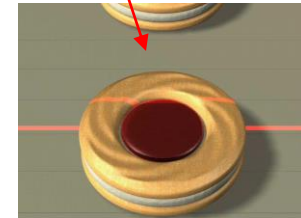
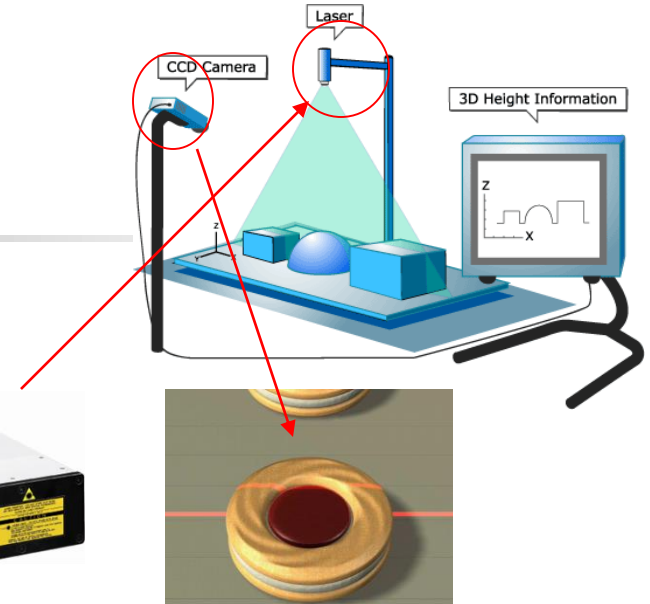




Types d'éclairage

■ Laser

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





Stratégies d'éclairage

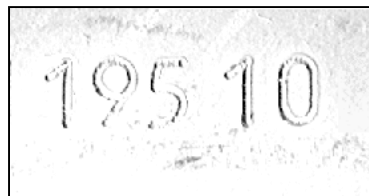
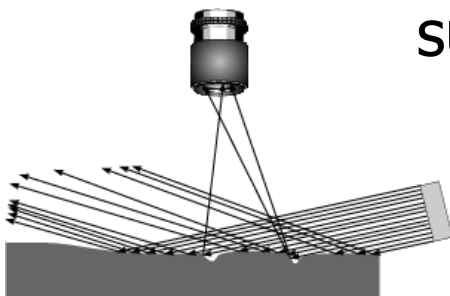
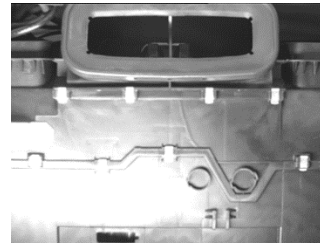
- Episcopie :

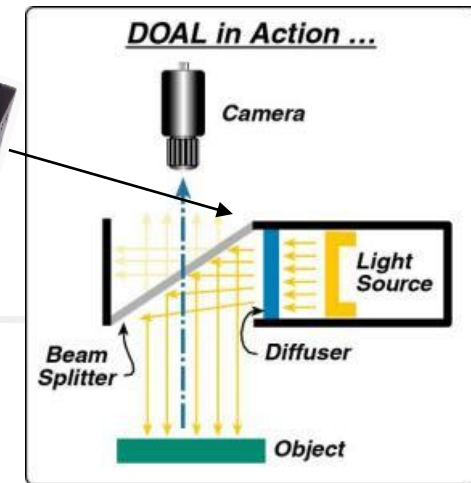
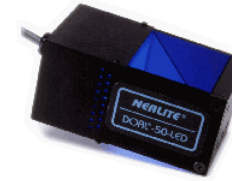
- Eclairage diffus

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

- Eclairage directionnel

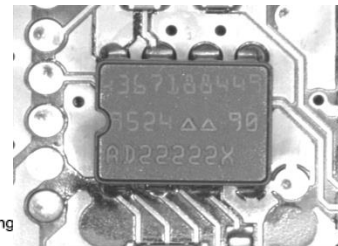
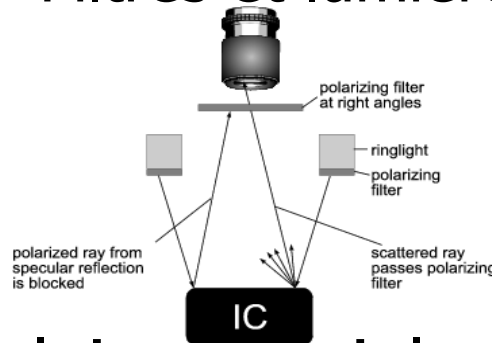
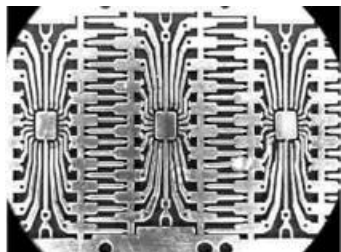
- Angles d'incidence pour éviter les réflexions de surfaces lisses





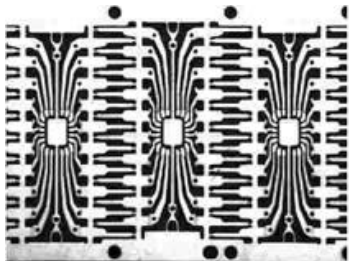
Stratégies d'éclairage

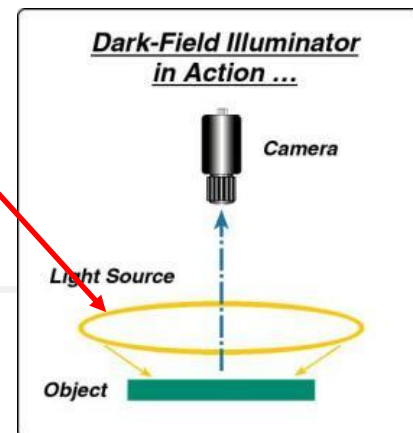
- Episcopie :
 - Eclairage polarisant
 - Filtres et lumières polarisants



- Eclairage axial ou coaxial

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



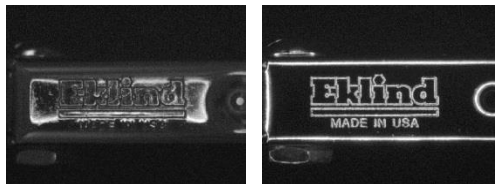
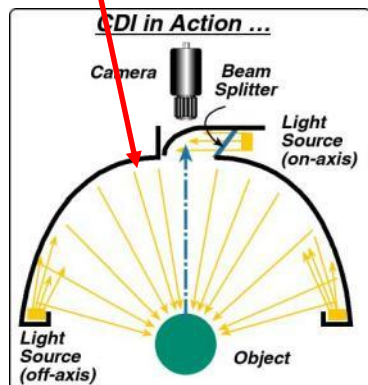


Stratégies d'éclairage

■ Episcopie :

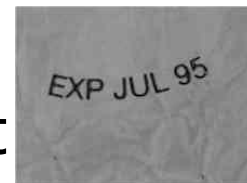
■ Eclairage annulaire rasant

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



■ Eclairage par sphère intégration

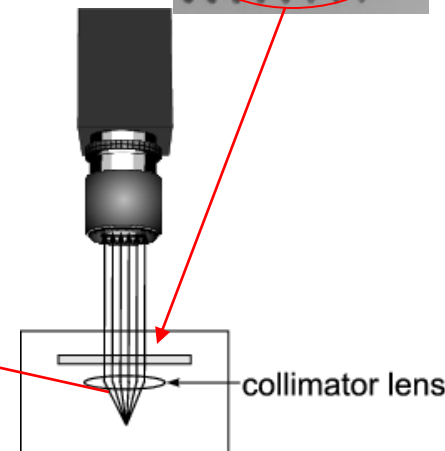
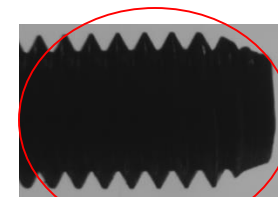
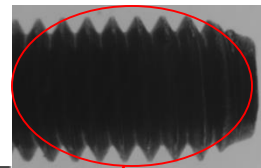
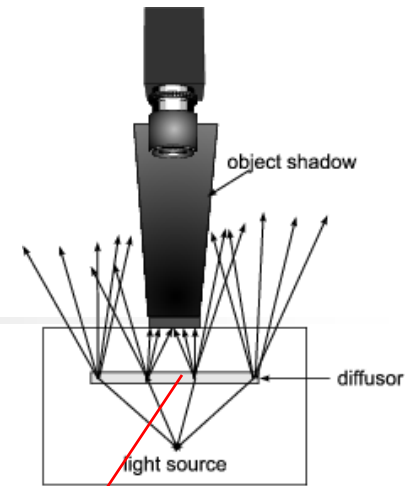
- Uniformisation de la réflexion d'un objet
- Lecture de texte sur surface réfléchissante non plane





Stratégies d'éclairage

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



collimator lens



Stratégies d'éclairage

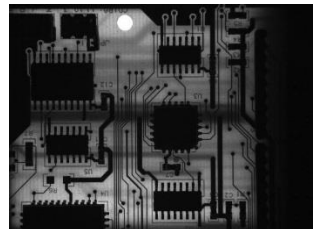
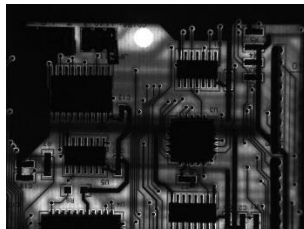
- Eclairage dans le non visible
 - Eclairage par UV



*Mise en évidence
du nylon dans un
polymère*

Eclairage NUV, caméras N&B et couleur

- Eclairage dans NIR



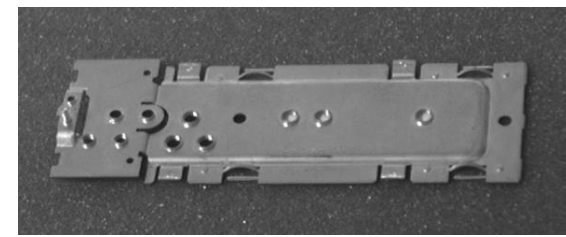
*Mise en évidence
d'un composant
électronique*

Eclairage rouge et NIR ("back-light")



Plan du cours (10h C/TD, 6h TP)

1. Introduction, colorimétrie (1h)
2. Acquisition des images (3h)
3. Contrôle optique de conformité (5h)
4. Correction annale (1h)

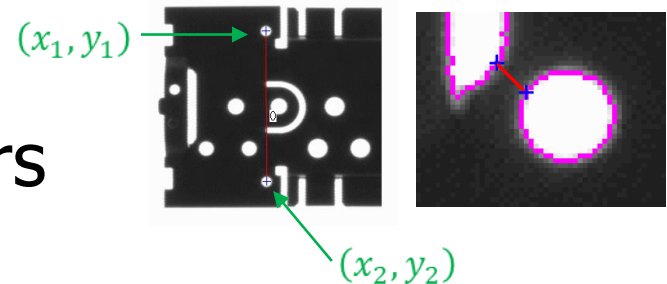


Métrologie

■ Variantes :

- Distance inter-pixels : $d_m = \sqrt{(C_x(x_1 - x_2))^2 + (C_y(y_1 - y_2))^2}$

- Distance aux contours
- Mesures au subpixel...



■ Mesures... et variations d'illumination

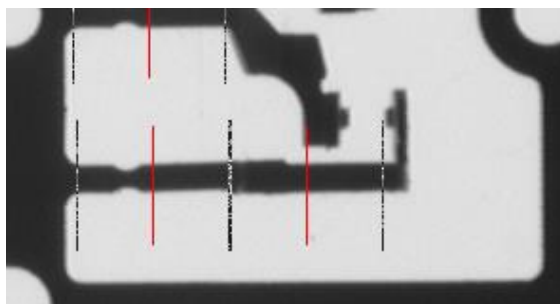


$5.5 \text{ pix} < \text{radius (hole)} < 7.5 \text{ pix}, d_m \pm 0.2 \text{ pix}$



Métrologie (Ex.)

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





Recalage 2D par « edge matching »

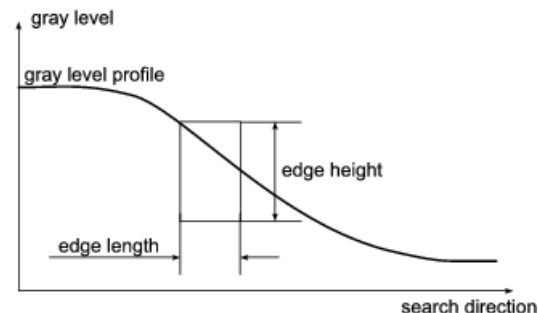
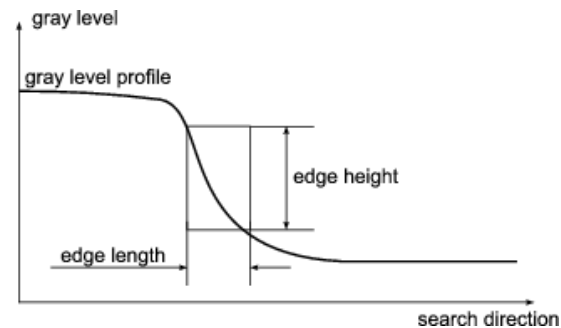
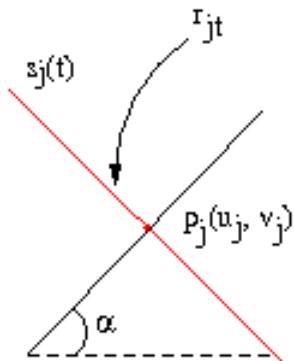
■ Score de corrélation :

Pour $-T < t < T$

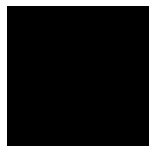
$$x_{jt} = u_j - t \cdot \sin \alpha, y_{jt} = v_j - t \cdot \cos \alpha$$

$$s_j(t) = \text{interpol}(x_{jt}, y_{jt}, I(x_{jt}, y_{jt}))$$

$$CM(t) = \frac{\sum_{\omega=-W}^W M(\omega) \cdot s_j(t + \omega)}{\sqrt{\sum_{\omega=-W}^W M(\omega)^2 \sum_{\omega=-W}^W s_j(t + \omega)^2}}$$



■ Vers la précision subpixellique...





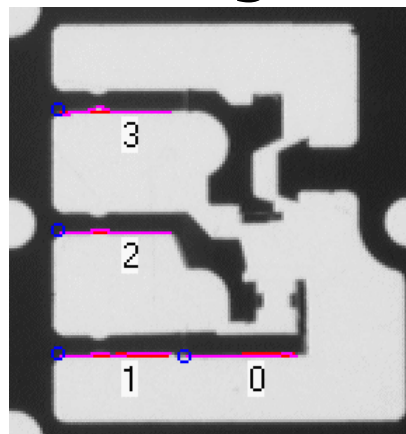
Métrologie (Ex.)

■ Solution :

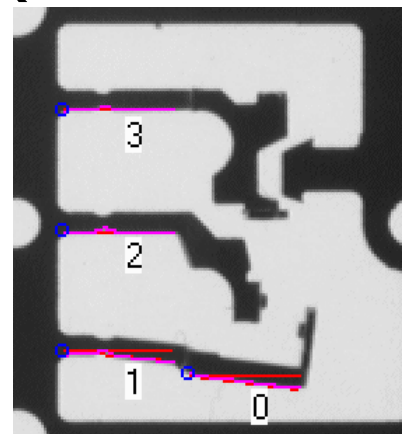
■ Extraction des segments associés

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

■ 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

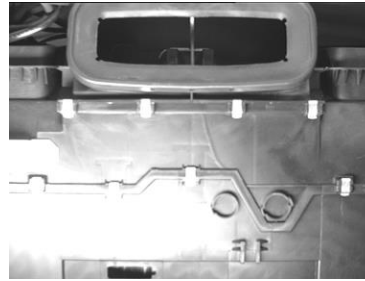


Ident no.	Text	Measurement	Nom.
✗ 0	Bottom right	-7.25	0.00
✗ 1	Bottom left	-4.89	0.00
✓ 2	Center	-0.14	0.00
✓ 3	Top	0.05	0.00



Vérification de présence (Ex.)

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



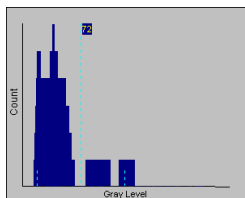
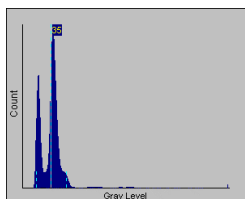
- Solution :
 - plusieurs caméras avec éclairage dédiée diffus (indirect ou diffuseur)



Vérification de présence (Ex.)

■ Solution :

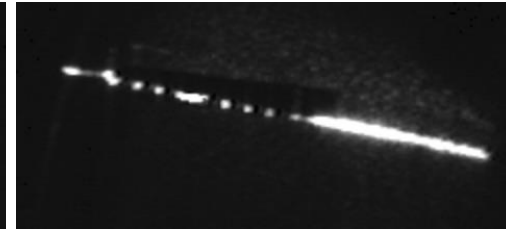
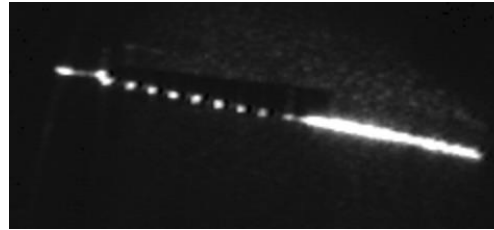
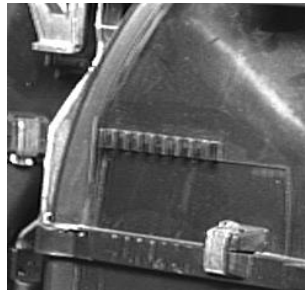
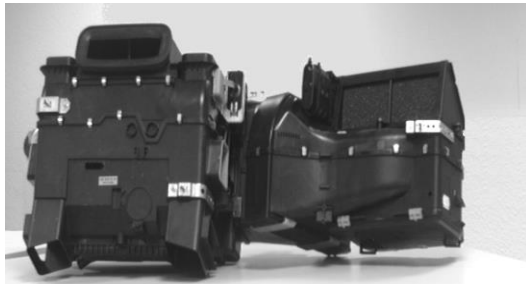
- Ajustement grossier de la position à partir d'une région caractéristique
- Segmentation des clips
 - Positionnement de ROIs
 - Lissage puis calcul de seuils locaux
- Décision basée sur des mesures (aire, ratio de dimension, etc.)



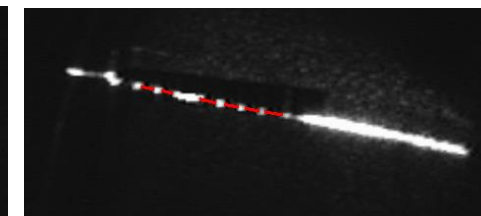
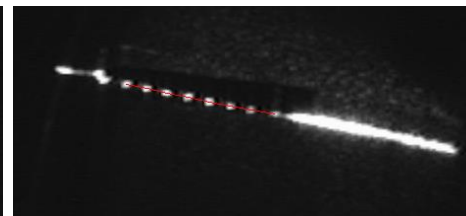
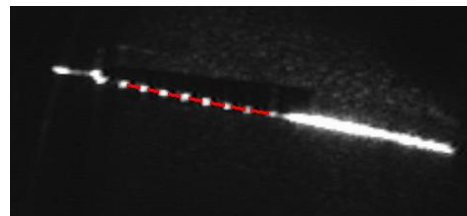
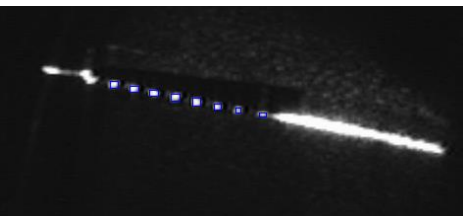


Vérification de présence (Ex.)

- But : vérifier la présence de porte-tube



- Solution :
 - Illumination par plan laser, binarisation, mesures de distance inter-régions alignées

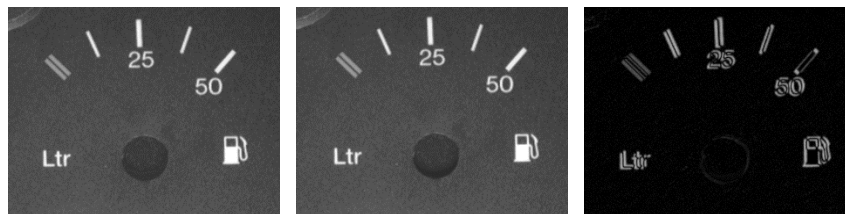




Identification de marqueurs (Ex.)

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

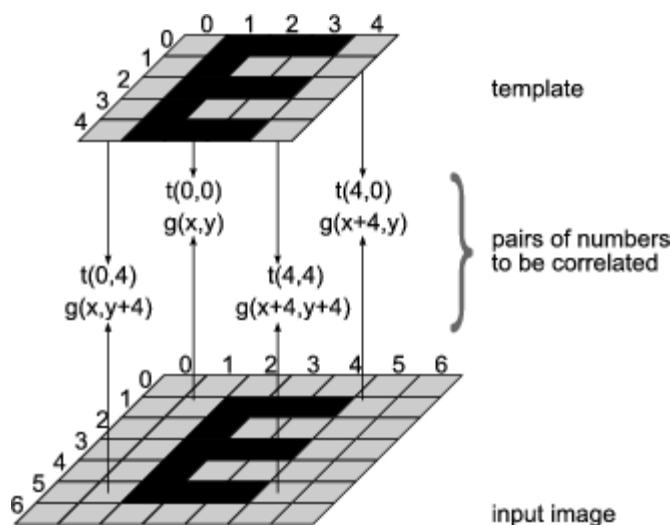
- Solution :



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

Reconnaissance par « bloc matching »

- « Template matching » : détecter la présence d'une forme *a priori* - Approche non ascendante...
- Mesure de similarité :



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

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

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

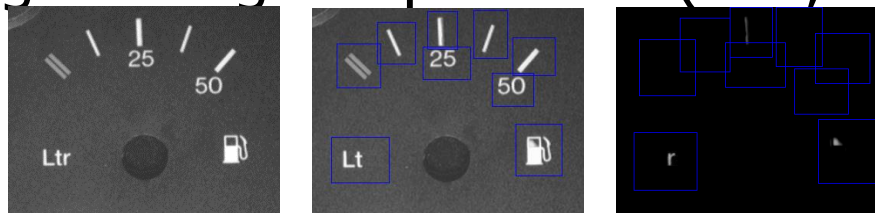
$p_1 = (u_1, v_1)^T$ apparié avec $p_2 = (u_2, v_2)^T$, $I(u, v)$ niveau en (u, v)



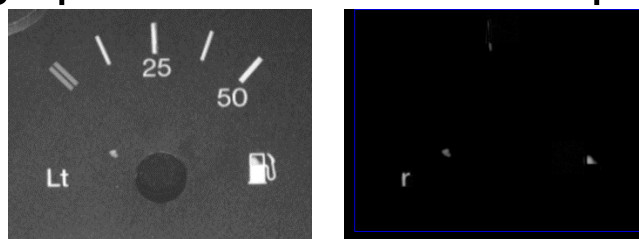
Identification de marqueurs (Ex.)

■ Solution :

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



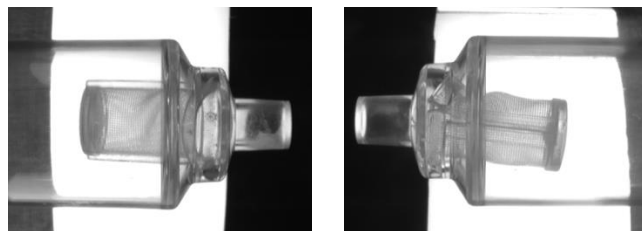
- Traiter l'image entière pour les défauts hors ROIs
 - Division de l'image en sous régions (2x2, 3x3, etc.) à chaque itération
 - Recalage par corrélation de chaque région





Contrôles de conformité multiples (Ex.)

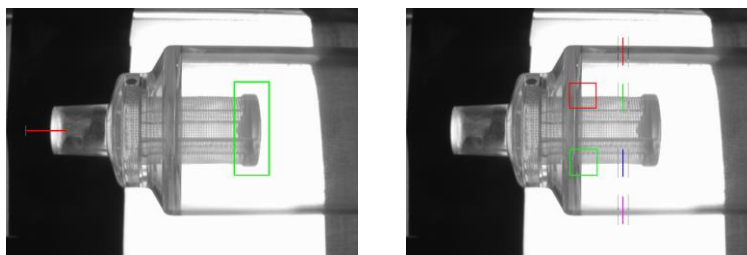
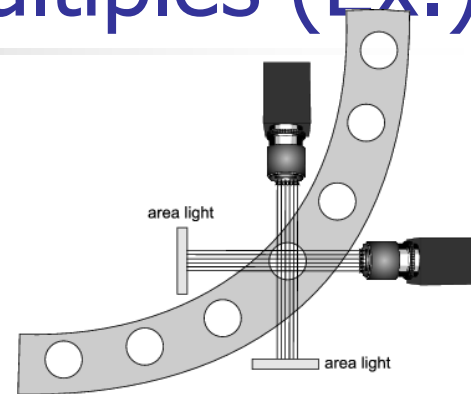
- But : inspection du filtre d'une chambre à goutte – 3 tâches :
 - longueur du filtre (T1)
 - centrage / récipient (T2)
 - diamètre du filtre à son extrémité sup. (T3)
- Solution :
 - Éclairage par l'arrière



Contrôles de conformité multiples (Ex.)

■ 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





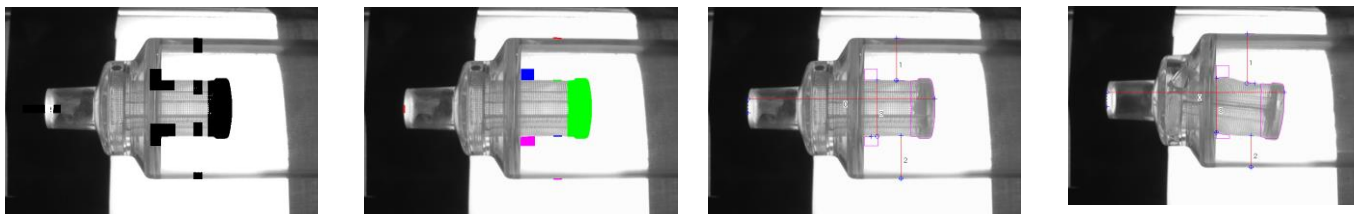
Contrôles de conformité multiples (Ex.)

■ Solution :

■ T3 (diamètre) :

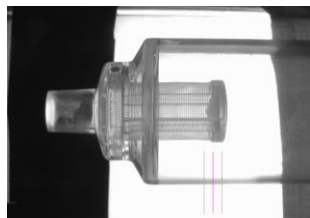
- Segmentation de régions par positionnement de ROIs

■ Simultanéité des tâches



■ Ajustement de la position :

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





Descripteurs de région

■ Descripteurs géométriques :

- Boîte englobante – dimensions

- Aire : $A(R) = \sum_{y=0}^{L-1} \sum_{x=0}^{C-1} f(x, y), f(x, y) = 1 \forall (x, y) \in R$

- Centre de gravité : $\bar{x} = \frac{1}{A(R)} \sum_{y=0}^{L-1} \sum_{x=0}^{C-1} x.f(x, y), \bar{y} = \frac{1}{A(R)} \sum_{y=0}^{L-1} \sum_{x=0}^{C-1} y.f(x, y)$

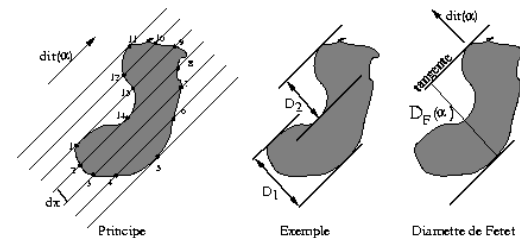
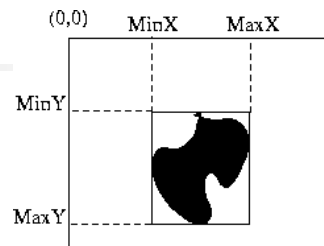
- Périmètre : nombre de pixels de la région ayant un voisin en dehors

- Direction par intercepts : $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$

$$D(X, \alpha) = \int N_\alpha(X).dx$$

$N_\alpha(X)$ nombre de points frontières

interceptant les lignes $d(\alpha)$



- Diamètre de Feret $D_F(\alpha)$: plus grande distance des contours de la région à T

- Compacité : $F_c = P(R)^2 / (4\pi.A(R))$



Descripteurs de région

■ Descripteurs géométriques :

- Moments d'inertie : $\mu_{pq} = \sum_{y=0}^{L-1} \sum_{x=0}^{C-1} (x - \bar{x})^p \cdot (y - \bar{y})^q \cdot f(x, y)$
- Orientation : $M = \begin{bmatrix} \mu_{20} & \mu_{11} \\ \mu_{11} & \mu_{02} \end{bmatrix}$, $\varphi = \frac{1}{2} \text{Arc tan} \left[\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}} \right]$, $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}$
- Moments normalisés (invariance échelle/translation) : $\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{\frac{p+q}{2}+1}}$
- 7 moments de Hu (invariance rotation en plus) : $I_1 = \eta_{20} + \eta_{02}$
 $I_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4 \cdot \eta_{11}^2$
 \dots
 $I_7 = \dots$

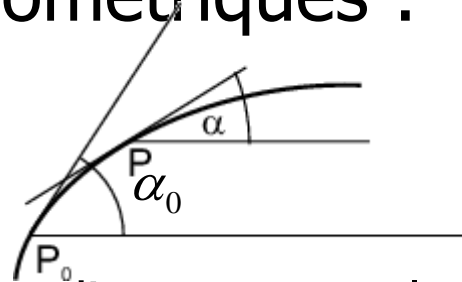


Descripteurs de région

■ Descripteurs géométriques :

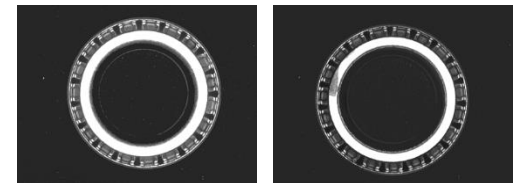
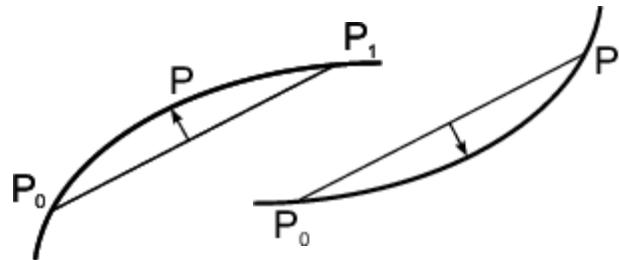
■ Courbure

■ Définition :



$$C = \lim_{P_0 \rightarrow P} \frac{\alpha - \alpha_0}{PP_0}$$

■ Mise en œuvre : distance entre le centre de la corde et la courbe



$$\sigma_c = 0.547 \quad \sigma_c = 1.206$$



Descripteurs de région

■ Descripteurs couleur

- Moments de la distribution couleur sur chaque plan (R,V,B) de résolution $N = NbL * NbC$

$$E_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{NbC} \sum_{j=1}^{NbL} R(i, j), \sigma_R = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{NbC} \sum_{j=1}^{NbL} (R(i, j) - E_R)^2 \right)}, s_R = \frac{1}{N} \sqrt[3]{\left(\sum_{i=1}^{NbC} \sum_{j=1}^{NbL} (R(i, j) - E_R)^3 \right)}$$

- Histogramme couleur : sur un espace couleur échantillonné par n classes couleurs (c_1, \dots, c_n)

$$\underline{h} = (h_{c_1}, h_{c_2}, \dots, h_{c_n}), h_{c_i} = \sum_{u \in R} \delta_{c_i}(b_u), b_u \in \{c_1, \dots, c_n\}, \sum_{i=1} h_{c_i} = 1$$

- Histogramme cumulé : $\underline{H} = (H_{c_1}, \dots, H_{c_n}), H_{c_i} = \sum_{c_j \leq c_i} h_{c_j}$

- Exemples de distance entre deux distributions :

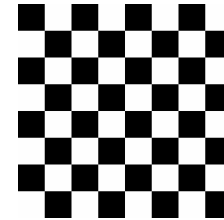
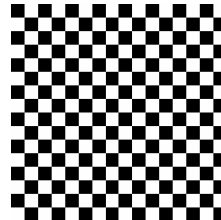
$$d_{bhattacha}(\underline{h}^1, \underline{h}^2) = \left(1 - \sum_{i=1}^n \sqrt{h_{c_i}^1 \cdot h_{c_i}^2} \right)^{1/2}, d_{kolmo}(\underline{H}^1, \underline{H}^2) = \max_{1 \leq i \leq n} |H_{c_i}^1 - H_{c_i}^2|$$



Descripteurs de région

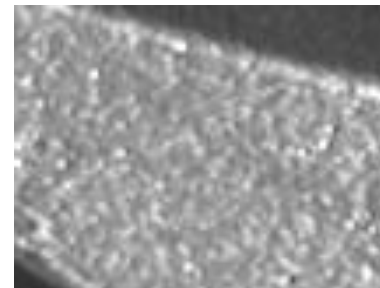
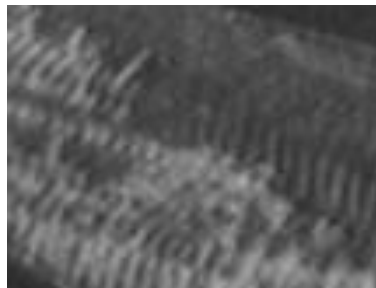
- Descripteurs de texture

- Statistiques du 1^{er} ordre : moyenne, écart-type, etc.



Statistiques identiques !

- Statistiques du 2^{ème} ordre (paires de pixels)



Surface aluminium polie (gauche) ou brute (droit) - gradient moyen entre paires de pixels connexes : 15.3 et 25.1



Descripteurs et recalage

- Constat : positionnement souvent imprécis → problème pour calculer les descripteurs



- Recalage en position

- Par l'objet entier : CdG de l'objet segmenté
- Par des contours spécifiques : segments de recherche



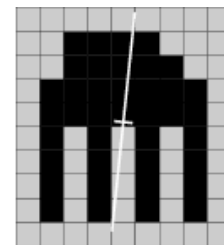
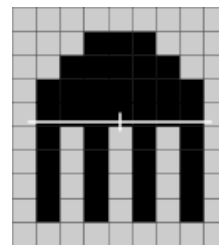


Descripteurs et recalage

■ Recalage en orientation

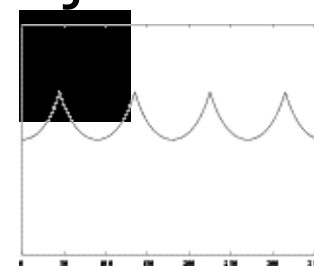
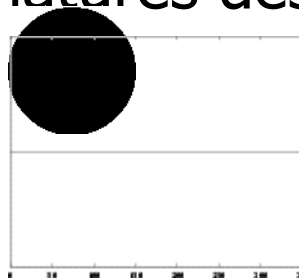
■ Calcul de l'axe d'inertie :

- Basé sur la matrice d'inertie
- Problème : cas des objets symétriques ou circulaires, temps de calcul



■ Signature distance *vs.* angle

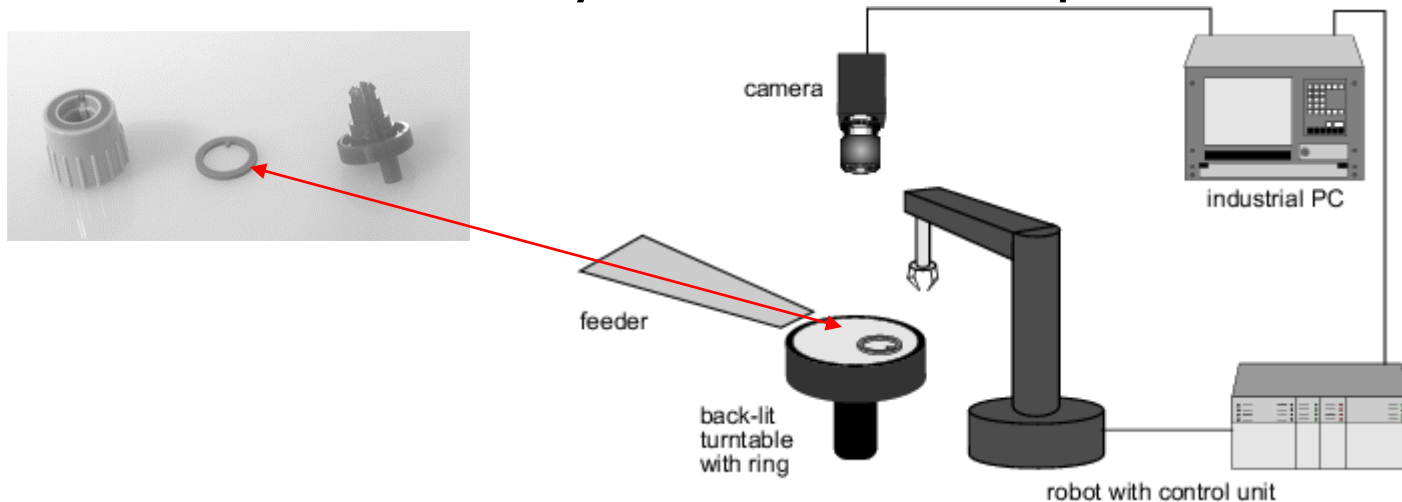
- Basé sur la distance contour-CdG pour chaque direction → calcul du décalage maximisant le recouvrement des signatures des objets référence et courant



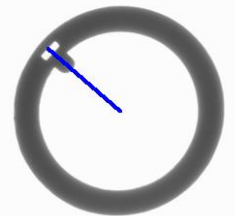
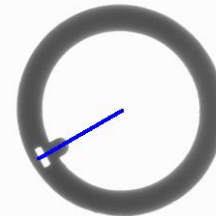
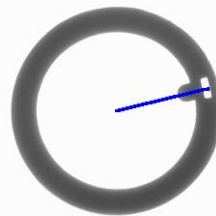


Recalage et robotique industrielle (Ex.)

- Assemblage par bras robotisé d'un bouton de contrôle de système électronique



Exemples de distance vs. angle (cercle, carré)



Distance contours internes-CdG vs. angle



Identification de marqueurs (Ex.)

- 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

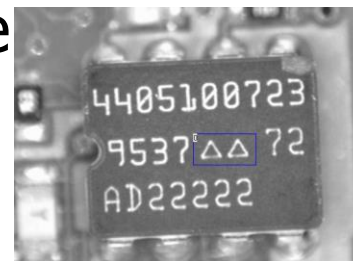
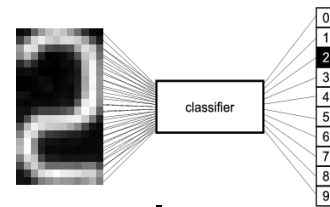
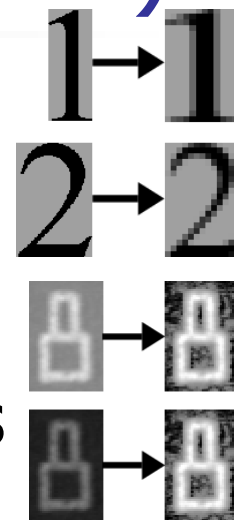




Identification de marqueurs (Ex.)

■ Solution :

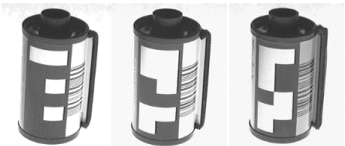
- Normalisation des imageries (taille, contraste)
- Classification par réseau de neurones
- Ajustement en position
 - Détection des arêtes verticales puis horizontales
 - Par « *template matching* » sur les 2 triangles puis localisation relative





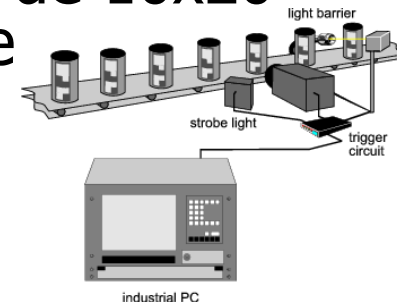
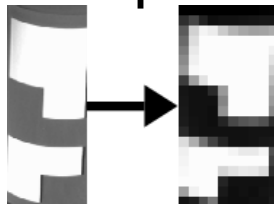
Identification de marqueurs (Ex.)

- But : identifier les codes de films 100, 200 et 400 ASA à 15 Hz, défilement rapide



- Solution :

- Caméra asynchrone – temps exposition court (1 ms) – éclairage stroboscopique
- recalage en position par une arête verticale – pas de variation verticale
- positionnement d'une ROI
- ré-échantillonnage sur une résolution de 10x20 pixels pour limiter l'information traitée
- classification par réseau de neurones





Contrôles de conformité multiples (Ex.)

- But : inspection sur une bougie – pré-requis : position connue de l'objet - 3 tâches :
 - Reconnaître les caractères inscrits (T1)
 - Caractériser le filtage (T2)
 - Vérifier la présence des rondelles (T3)



Contrôles de conformité multiples (Ex.)

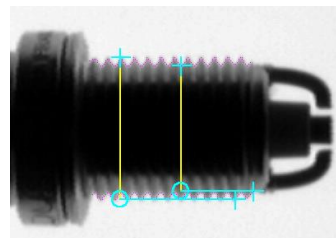
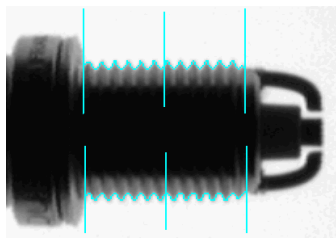
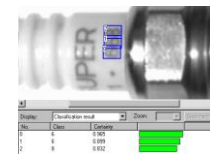
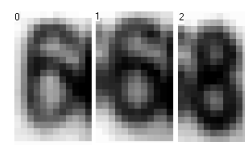
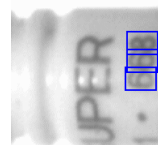
■ Solution :

■ T1 (OCR) :

- éclairage de face
- Positionnement ROI et segmentation région
- Ré-échantillonnage et classification des caractères

■ T2 (filtage) :

- Éclairage arrière
- Ligne de recherche et extraction des contours
- Mesure de diamètre et profondeur de gorge

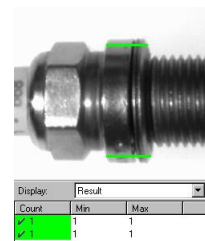




Contrôles de conformité multiples (Ex.)

■ Solution :

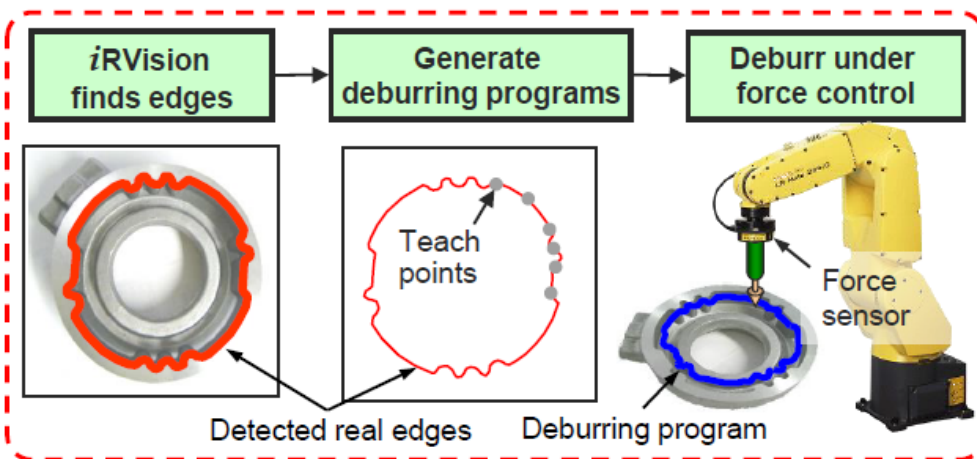
- T3 (rondelles) :
 - Éclairage de face
 - Lignes de recherche et extraction de sous segments
 - Calcul de leur longueur... mesure par défaut





Manipulation robotique (Ex.)

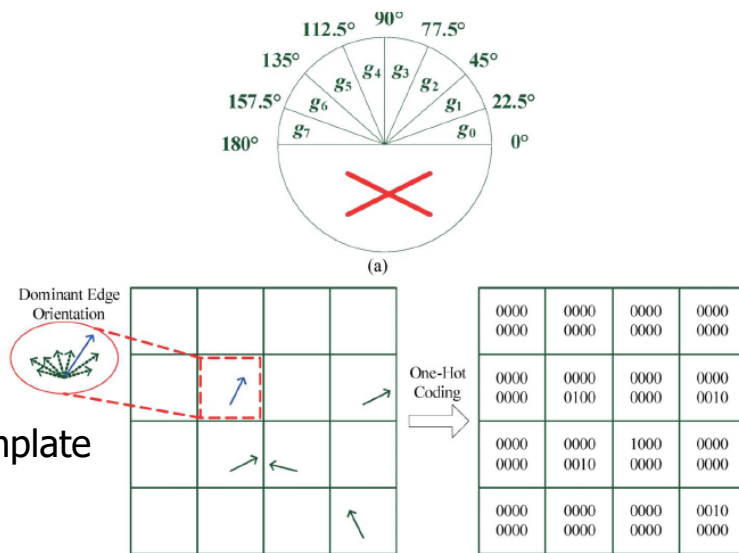
- Ebavurage de pièces et planification automatique de trajectoires



[[Fanuc-deburring.mp4](#)]

« Edge-based template matching » (1/2)

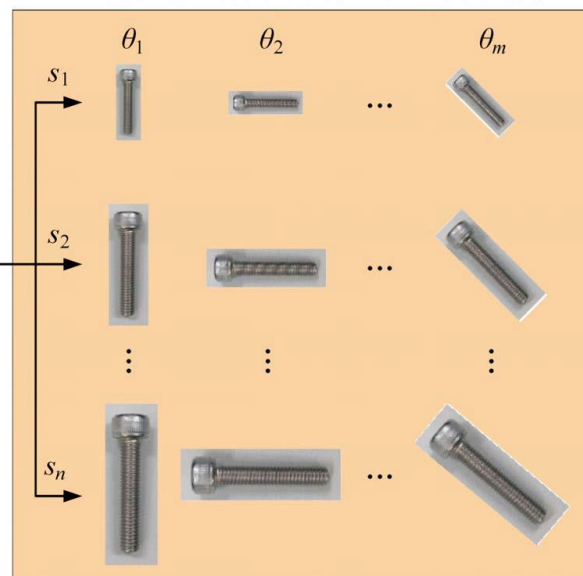
- Applicable à des modèles de contours
- Application au multi-template (Ω)



Découpage du template en N blocs

$$\mathbf{p}_{ij} = \begin{bmatrix} s_i \cos \theta_j & -s_i \sin \theta_j \\ s_i \sin \theta_j & s_i \cos \theta_j \end{bmatrix} \mathbf{p}_{ref} \text{ for } i = 1 \sim n \text{ and } j = 1 \sim m$$

2D Hierarchical Model of the OOI with Different Poses





« Edge-based template matching » (2/2)

- Mesure de similarité spatiale entre template i et image I :

$$S(t_{ij}, I_j) = \text{Census Transf}(t_{ij}, I_j)$$

$$S(t_i, I) = \frac{\sum_{j=1}^N S(t_{ij}, I_j)}{N}$$

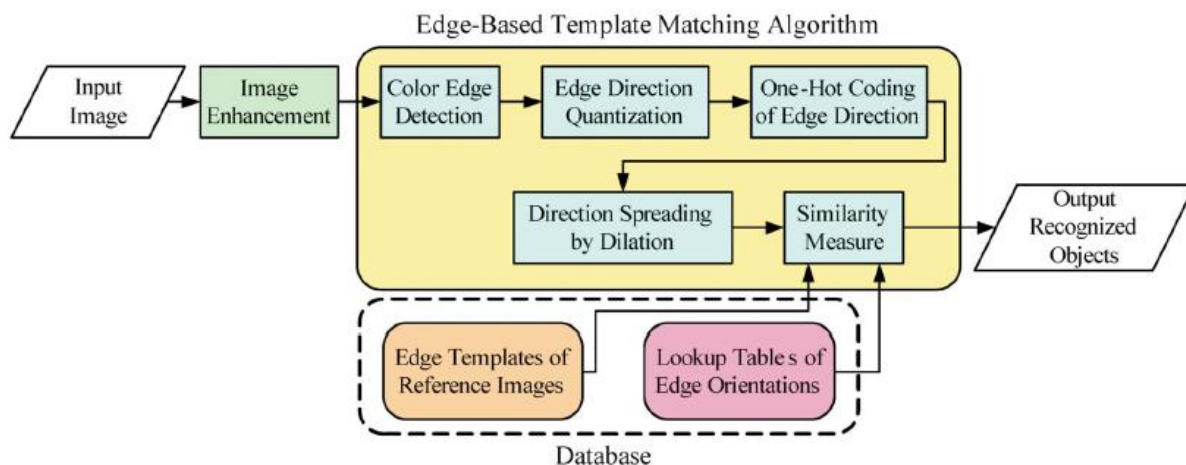
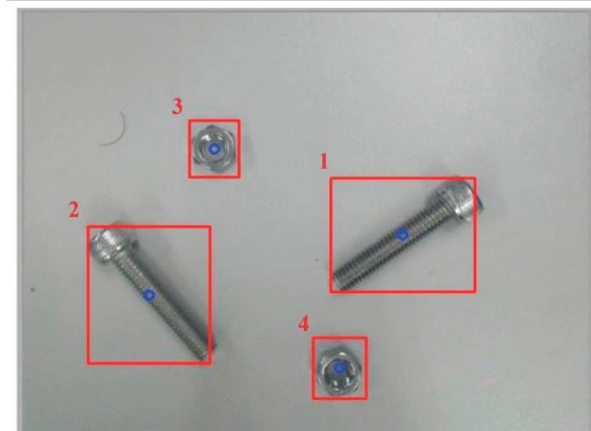


Table 2. Experimental result of detecting and recognizing multiple Class 0 and Class 1 textureless objects



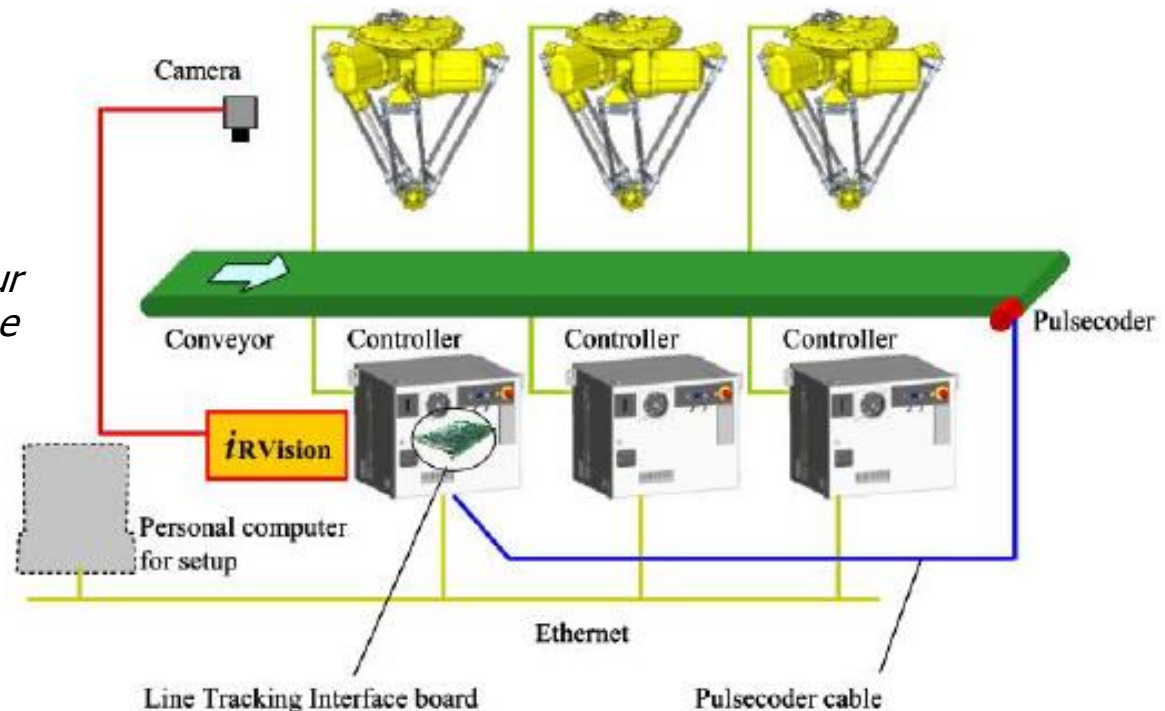
Index	Class	ROI position (x, y)	Orientation (degree)	Similarity T_s (%)
1	1	(347, 187)	305	95.6
2	1	(72, 242)	40	92.5
3	0	(187, 122)	30	91.3
4	0	(327, 367)	25	87.7



Manipulation robotique (Ex.)

- Pose et dépose de pièces par coopération multi-robots

*Détection visuelle des pièces et suivi
par encodeur incrémental sur le convoyeur
→ Saisie des pièces sans arrêt du système*

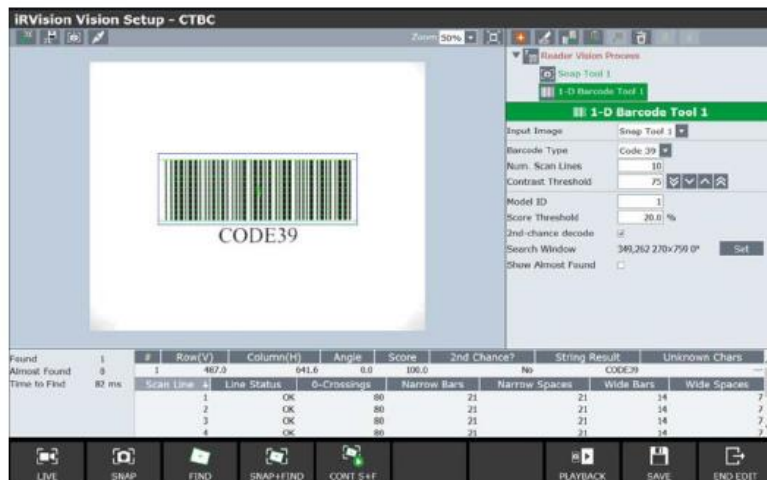




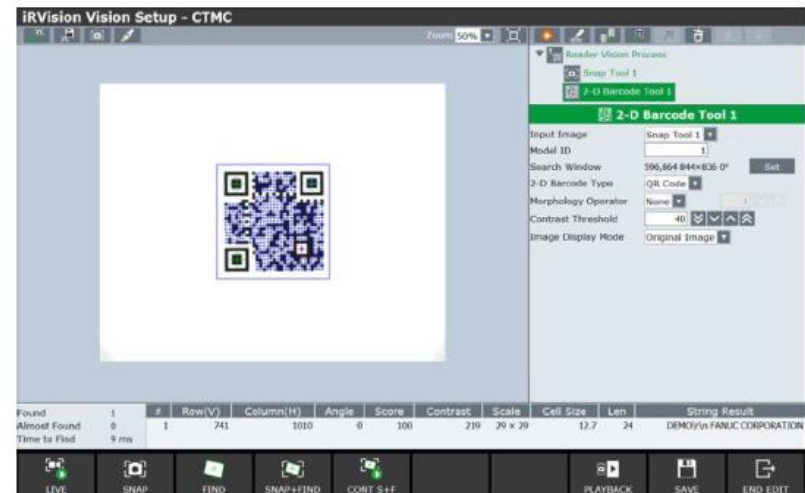
Manipulation robotique (Ex.)

- Lecture de codes barre 1D ou 2D. Application au tri d'objets en vrac

1-D Barcode Reader



2-D Barcode Reader

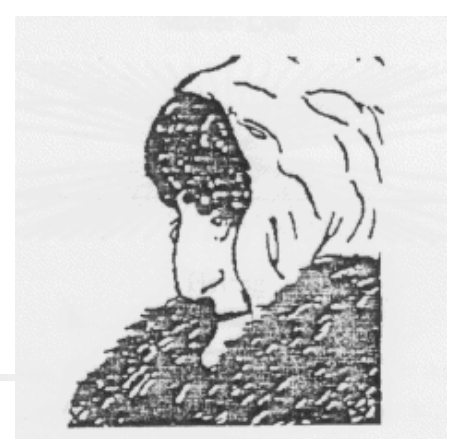


Détection visuelle des pièces pour prise par le robot
Lecture code-barre par template matching pour le tri

[[Fanuc-code-barre.mp4](#)]



Bibliographie



- « Industrial image processing ». C.Demant, B.Streicher-Abel, P.Waszkewitz. Edition SPRINGER
- « Handbook of machine vision ». A.Hornberg. Edition WILEY
- « Automated visual inspection ». B.G.Batchelor, D.A.Hill, D.C.Hodgson. Edition Elsevier
- « Digital image processing ». R.C.Gonzalez et R.E.Woods. Edition Addison Wesley