

# Vision industrielle

## Dispositif de capture d'image



# Vision industrielle

## Dispositif de capture d'image

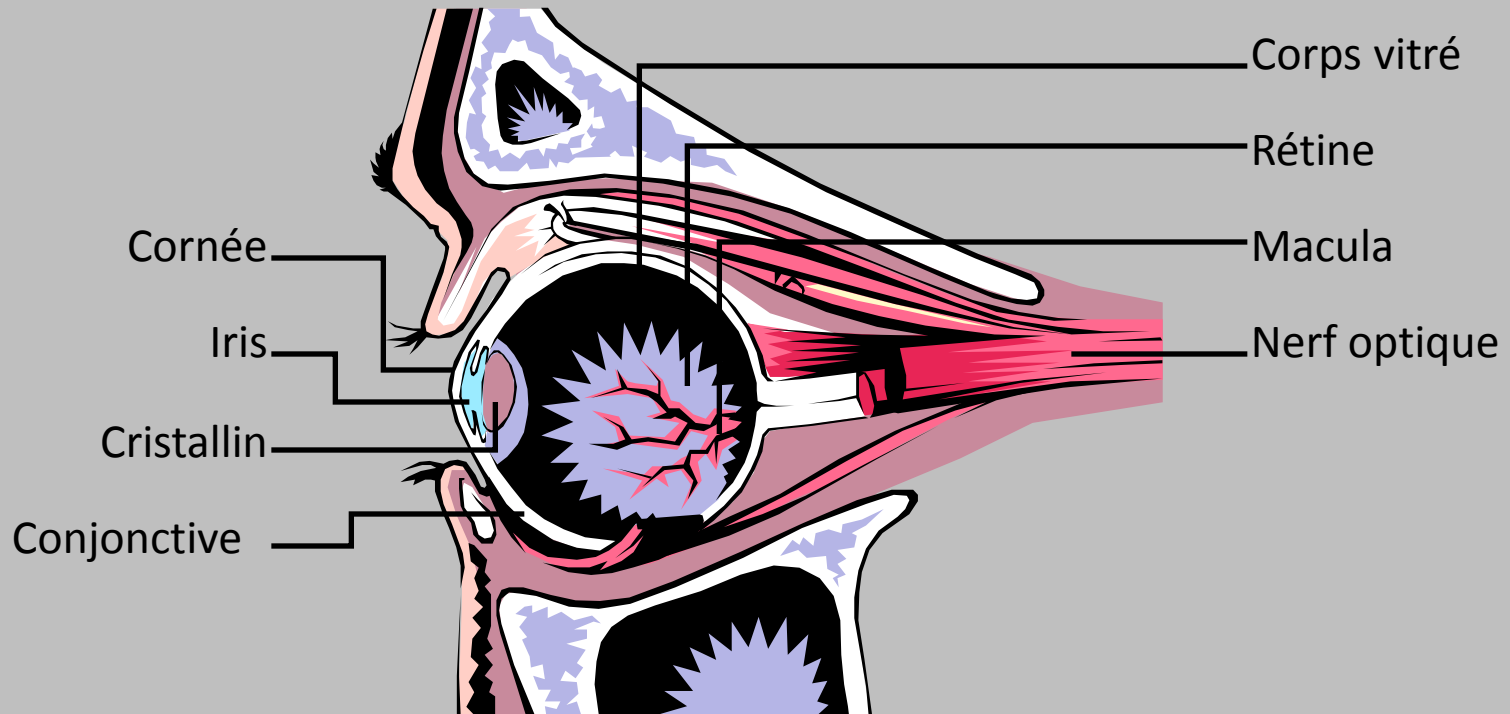
La caméra

# Plan du cours

- Vision humaine
- La caméra
- CCD / CMOS
- Monochrome / Couleur
- Analogique / Numérique
- Matricielle / Linéaire

# L'œil

- Composition



# L'œil

- Composition

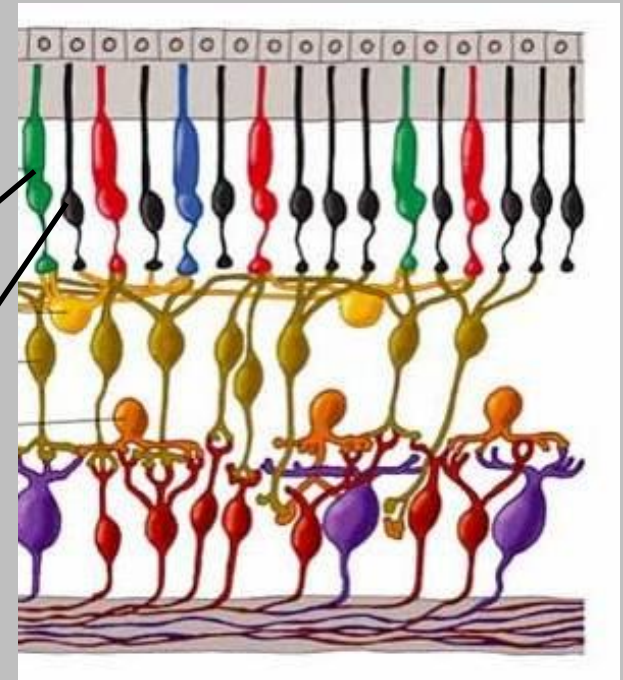
- La **conjonctive** : c'est une solide membrane blanche, opaque aux rayons lumineux, servant à attacher l'œil dans son orbite.
- La **cornée** : il s'agit d'une membrane transparente et résistante située sur la face avant de l'œil. Son rôle est de protéger le globe oculaire sur la face avant.
- L'**iris** : il fonctionne comme un diaphragme en dosant la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil. Son ouverture centrale est la **pupille**.
- Le **cristallin** : il fonctionne comme une lentille à focale variable, grâce à sa capacité de modifier sa courbure.

# L'œil

- La rétine
  - C'est sur elle que viennent se projeter les images de la scène que nous observons. Elle contient deux types de cellules photosensibles : les **cônes** et les **bâtonnets**.

*Cônes : ils permettent la vision diurne  
(vision photopique)*

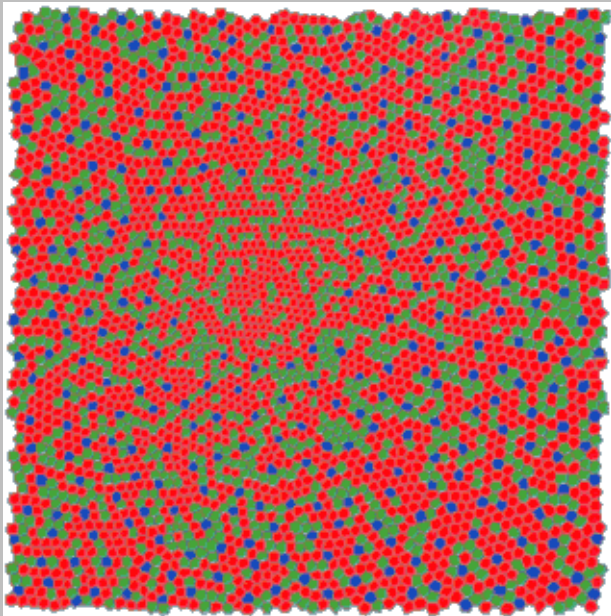
*Bâtonnets : ils permettent la vision nocturne  
(vision scotopique)*



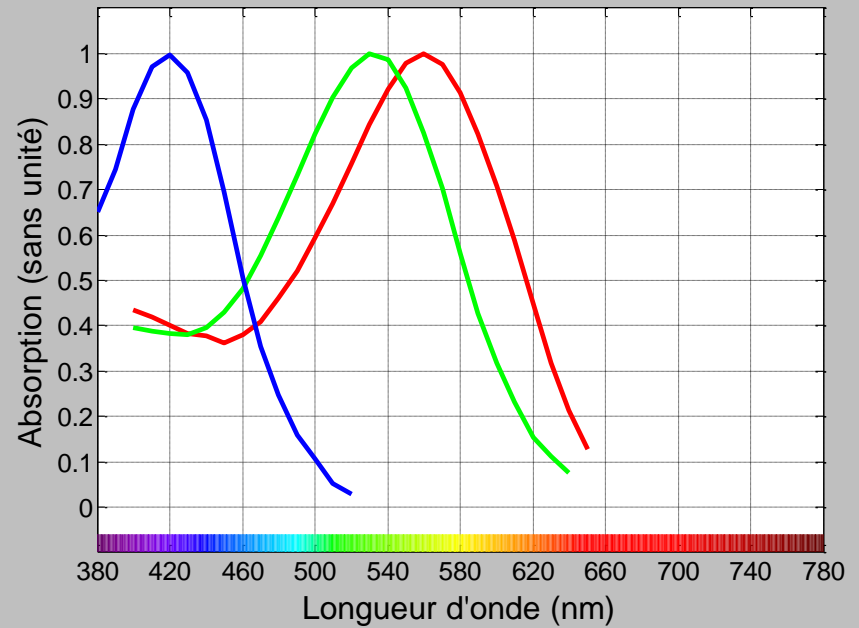
# L'œil

- Les cônes sont de trois types :
  - ◆ cônes S (short) sensibles aux longueurs d'onde courtes (bleu),
  - ◆ cônes M (medium) sensibles aux longueurs d'onde moyennes (vert),
  - ◆ cônes L (long) sensibles aux longueurs d'onde longues (rouge).
- La **macula** est également appelée tache jaune. Elle contient en son centre une petite dépression, la fovéa. Cette dernière est la zone d'acuité maximum de l'œil qui se distingue par une concentration maximale de cônes pour une très faible concentration en bâtonnets.

# L'œil



Répartition des cônes

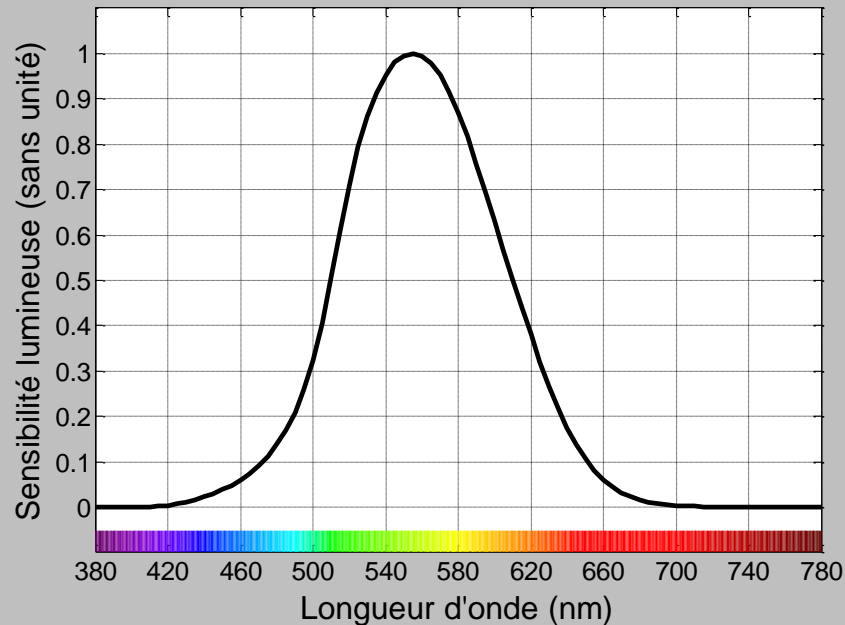


Fonctions d'absorption relative des cônes



# L'œil

- Sensibilité lumineuse de l'œil



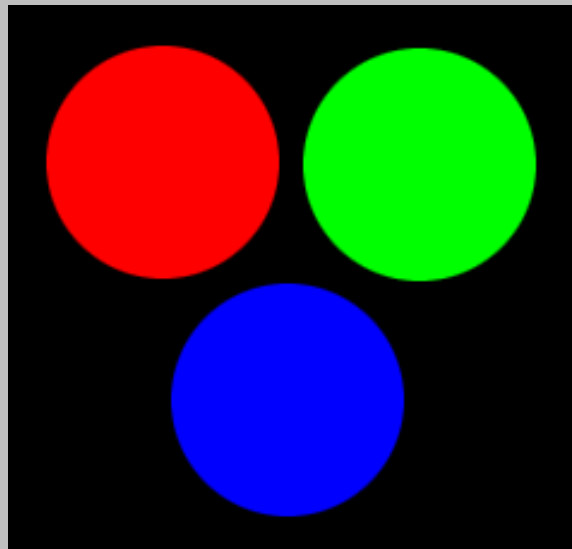
*L'œil humain est plus sensible aux couleurs verte ou jaune qui nous apparaissent plus claires que les couleurs bleu ou rouge plus sombres.*

*Fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil*

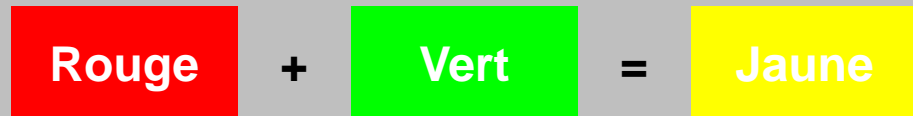
# Théorie trichrome

- Définition

- Tout stimulus de couleur peut être reproduit par le mélange de trois autres stimuli : le rouge, le vert et le bleu, appelées **primaires**.

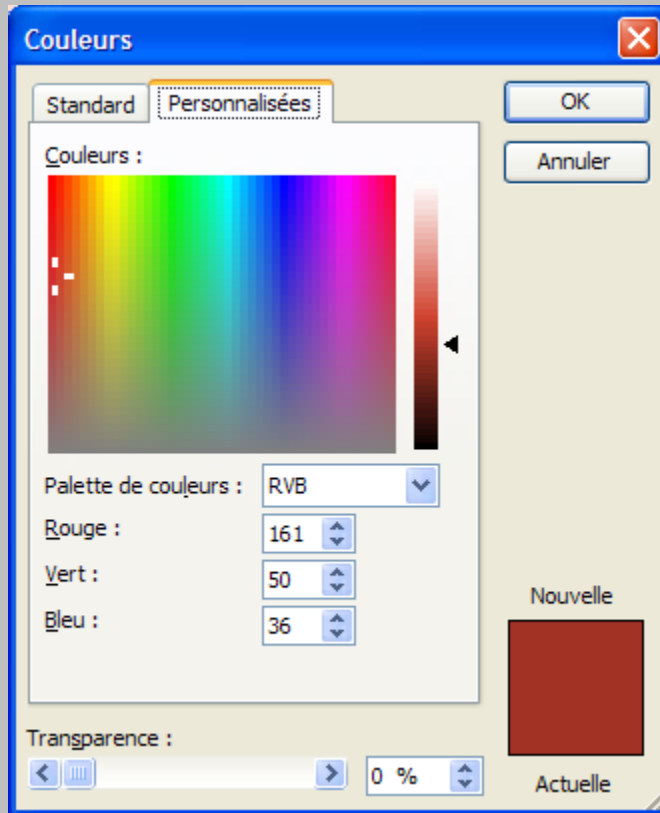


*Synthèse additive*

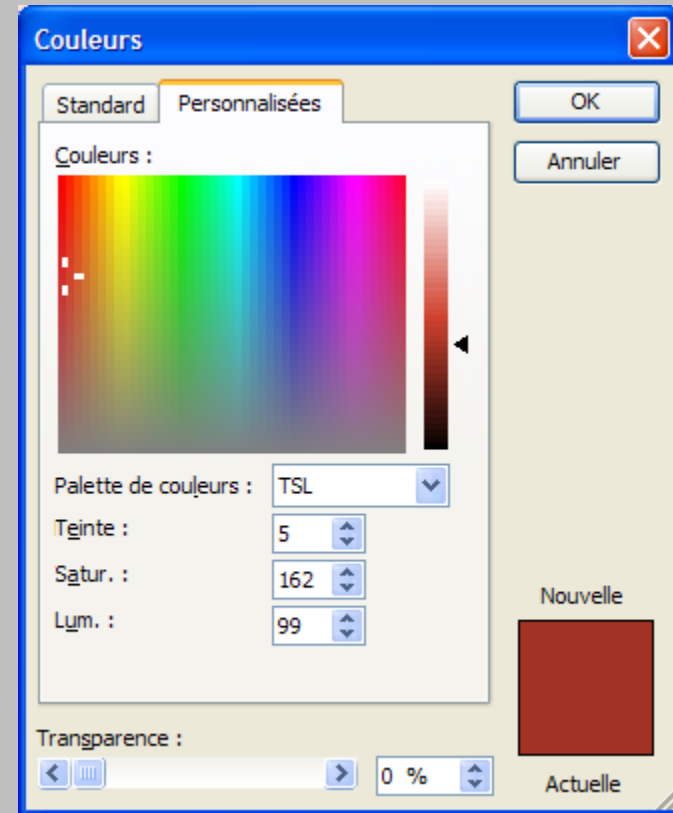


# Représentation de la couleur

- Autres espaces



*Espace RVB*



*Espace TSL*

# Représentation de la couleur

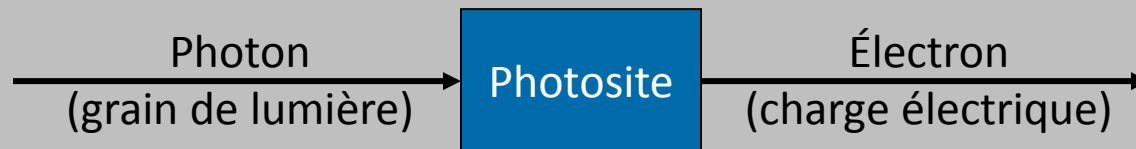
- Exemple : l'espace Teinte – Saturation – Luminance
  - La **Teinte** correspond à la longueur d'onde dominante de la lumière, c'est-à-dire la longueur d'onde pour laquelle l'énergie correspondante est la plus élevée.
  - La **Saturation** représente la pureté de la couleur. Elle correspond au rapport entre l'énergie de la longueur d'onde dominante et celle des autres longueurs d'onde.
  - La **Luminosité** (ou luminance par abus de langage) correspond à la quantité d'énergie lumineuse.

# Définition

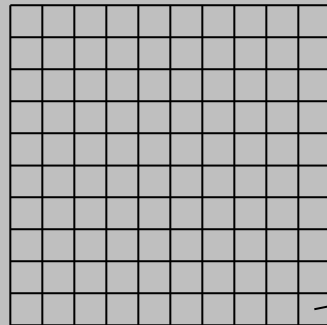
- La caméra est l'élément qui permet de capturer l'image d'une scène réelle.
- Elle est composée :
  - d'un capteur constitué d'éléments semi-conducteurs photosensibles (silicium) qui convertissent l'énergie lumineuse (photon) en énergie électrique (électron) et qui sont disposés sous forme matricielle ou linéaire,
  - de composants électroniques permettant la mise en forme du signal image.

# Fonctionnement

- Capteur d'image
  - Constitué d'un ensemble de photosites (cellule photosensible de 3 à 30  $\mu\text{m}$ ) alimenté électriquement pour accumuler des charges.
  - Basé sur une technologie à semi-conducteur, Il se présente sous la forme d'un circuit intégré.
  - La partie photosensible (photodiode) est constituée de silicium qui est dopé de manière à acquérir des propriétés photosensibles.

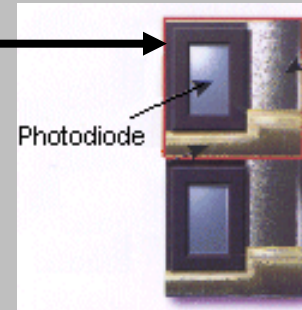


# Fonctionnement

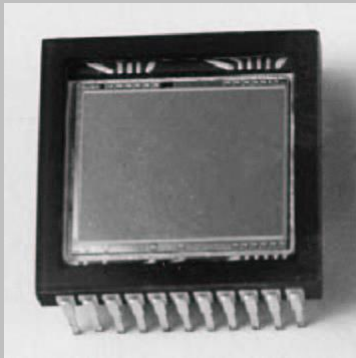


Matrice

Photosite



Photodiode



Capteur

# Fonctionnement

- Temps d'intégration
  - L'image est acquise en deux temps :
    - ◆ Un **temps d'intégration** : c'est le temps pendant lequel le capteur doit être exposé à la lumière. L'arrivée de photons crée des charges qui s'accumulent au sein des photosites.
    - ◆ Un **temps de transfert** : après le temps d'intégration, les charges accumulées sont transférées vers l'extérieur du capteur pour être converties en tension et donner le signal vidéo.
    - ◆ C'est principalement la manière dont les charges sont transférées qui différencient les types de capteurs.
  - L'inspection d'objets en mouvement nécessite des temps d'intégration faibles pour obtenir des images nettes.



# Caractéristiques

- Sensibilité
  - Variation électrique pour un éclairage donné.
  - Intensité lumineuse minimale que la caméra peut détecter.
  - Valeur minimale d'entrée qui provoque un changement de valeur de sortie.
  - Lorsque la sensibilité est faible, la caméra est limitée pour des applications à temps d'intégration faible.
  - Lorsque la sensibilité est trop forte, il y a risque de saturation du capteur (*blooming, smearing*).



*blooming et smearing*



# Caractéristiques

- Sensibilité

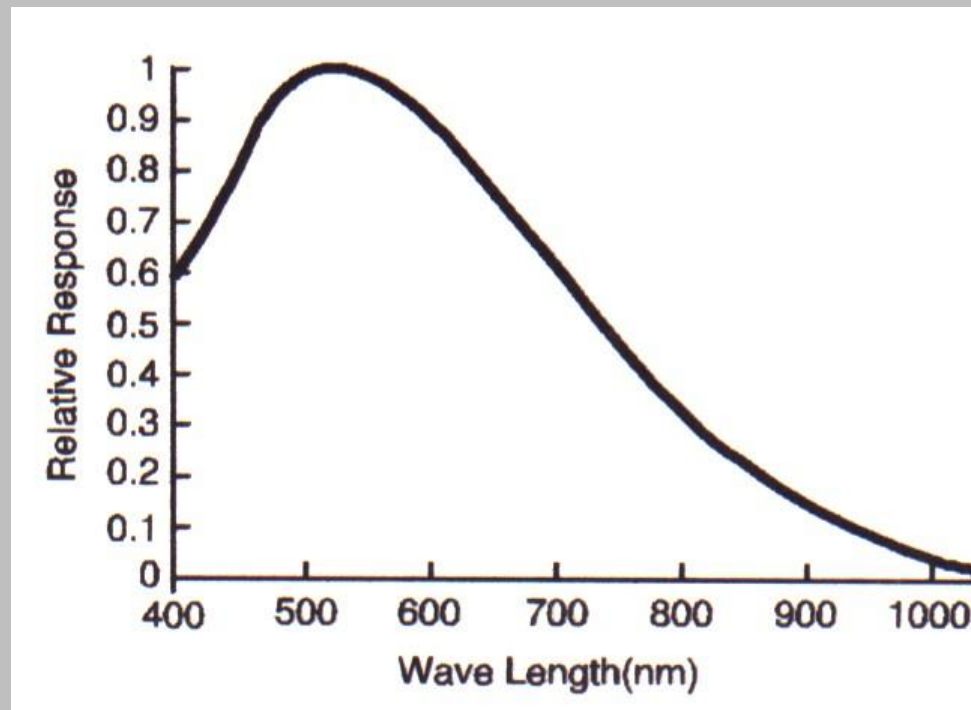
- Dépend de :

- ◆ la **dynamique** : rapport entre le niveau de luminosité maximum et minimum que peut détecter la caméra en l'absence de bruit.
- ◆ la **capacité du puits de charge** : la quantité de charges qu'un photosite peut stocker.
- ◆ l'**efficacité quantique** : rapport entre le nombre de photons incidents et le nombre d'électrons créés.
- ◆ le **facteur de remplissage** : rapport entre la surface photosensible d'un photosite et sa surface totale.

# Caractéristiques

- Réponse (ou sensibilité) spectrale
  - C'est la région du spectre dans laquelle est sensible la caméra.
  - Les capteurs sont sensibles dans le visible mais également dans le proche infrarouge (IR) et l'ultraviolet (UV).
  - Lorsque leur maximum de sensibilité est centré sur le rouge, l'utilisation de filtres infrarouges est souvent préconisée.
  - Au contraire, la sensibilité de certains capteurs dans l'infrarouge ou l'ultraviolet permet de concevoir des caméras IR et des caméras UV.

# Caractéristiques



*Réponse spectrale de la caméra monochrome SONY XC-55*

# Caractéristiques

- Rapport signal/bruit
  - C'est le rapport entre la puissance du signal de sortie et le niveau du bruit présent en absence de signal.
  - Il dépend notamment de l'électronique associée au capteur.
- Fréquence d'acquisition
  - C'est le nombre d'images par seconde que peut acquérir la caméra.
- Température de fonctionnement
- Résolution (ou définition)
  - C'est le nombre de pixels du capteur.

# Caractéristiques

Dénomination	Résolution	Rapport	Taille image (pixels)
QVGA	320 × 240	4:3	76 800
VGA	640 × 480	4:3	307 200
SVGA	800 × 600	4:3	480 000
XGA	1024 × 768	4:3	786 432
SXGA	1280 × 1024	5:4	1 310 720
UXGA	1600 × 1200	4:3	1 920 000
QXGA	2048 × 1536	4:3	3 145 728
QSXGA	2592 × 1944	4:3	5 038 848

*Les résolutions standard de capteurs*

# Caractéristiques

- Taille du capteur
  - Taille (ou pas) de pixel : dimension du côté d'un élément photosensible.
  - Pour une même résolution, plus le pas de pixel est grand, plus la taille du capteur est grande, plus il est sensible.
  - Les tailles ont été créées pour les caméras à tubes et ont gardé les mêmes caractéristiques pour les caméras à semi-conducteurs. Leurs dénominations correspondent donc à la taille de la diagonale des caméras à tubes.
  - Le rapport entre la hauteur et la largeur du capteur est de  $4/3$ . Ce rapport est celui qui correspond le mieux au champ visuel humain pour que l'image n'apparaisse pas déformée.

# Caractéristiques

Dénomination	Taille (mm)	Rapport	Diagonale (mm)
1/4"	3,2 × 2,4	4:3	4
1/3"	4,8 × 3,6	4:3	6
1/2"	6,4 × 4,8	4:3	8
1/1,8"	7,176 × 5,319	4:3	8,933
2/3"	8,8 × 6,6	4:3	11
1"	12,8 × 9,6	4:3	16
4/3"	18 × 13,5	4:3	22,5

*Les tailles standard de capteurs  
(1" (pouce) = 2,54 cm est fixé à 16 mm)*



# Paramètres de réglage

- Gain

- Facteur multiplicatif permettant d'amplifier le signal image avant qu'il ne soit numérisé.
- L'augmentation du gain permet de compenser un manque de lumière mais amplifie également le bruit présent dans le signal.
- Il peut être fixe ou automatique.

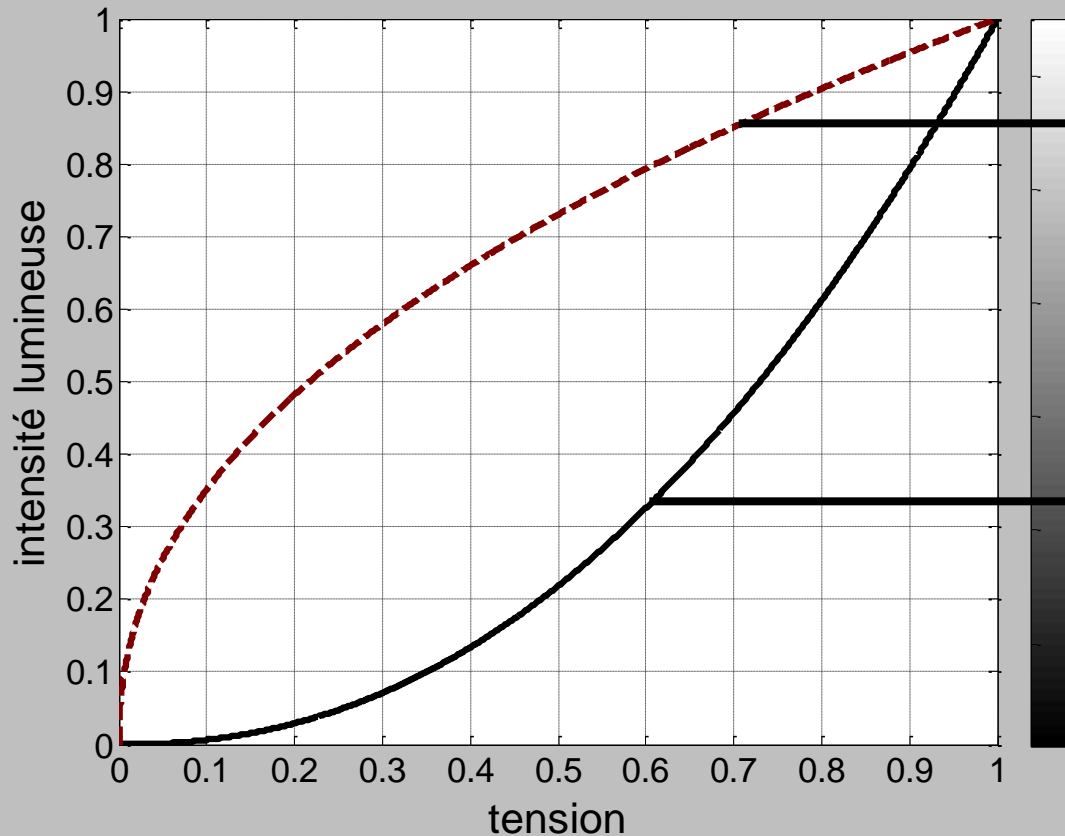
- Offset

- Lorsque le niveau de luminosité est trop faible, le capteur de la caméra n'est pas sensibilisé. Un minimum de luminosité est nécessaire.
- L'offset est un facteur additif permettant d'obtenir une réponse du capteur pour des niveaux de luminosité inférieurs au niveau minimum.

# Paramètres de réglage

- Fonction de transfert
  - C'est le lien entre le signal lumineux et le signal électrique.
  - Les charges s'accumulent proportionnellement au nombre de photons incidents.
  - Par exemple, une **correction gamma** est souvent utilisée pour que la fonction de transfert du capteur soit proche de celle de l'œil humain mais aussi pour que l'image soit correctement affichée sur des écrans.

# Paramètres de réglage



La correction gamma consiste à compenser cette non linéarité en appliquant une loi inverse sur la caméra :

$$V = I^{(1/\text{gamma})}$$

L'intensité lumineuse  $I$  des écrans n'est pas proportionnelle à leur tension d'alimentation  $V$  mais suit une loi du type :  $I = V^{\text{gamma}}$  qui rend les images plus sombres

# Paramètres de réglage

- Binning
  - Technique qui consiste à regrouper plusieurs photosites adjacents, en général deux horizontalement et/ou deux verticalement, afin de n'en former qu'un seul.
  - L'augmentation de la surface photosensible réduit la résolution mais permet d'augmenter la sensibilité du capteur, le temps d'acquisition et le rapport signal/bruit.

# Les différents types de caméras

- CCD ou CMOS
- Monochrome ou couleur (multispectrale, IR, UV...)
- Analogique, numérique ou intelligente
- Matricielle ou linéaire

# Le capteur CCD

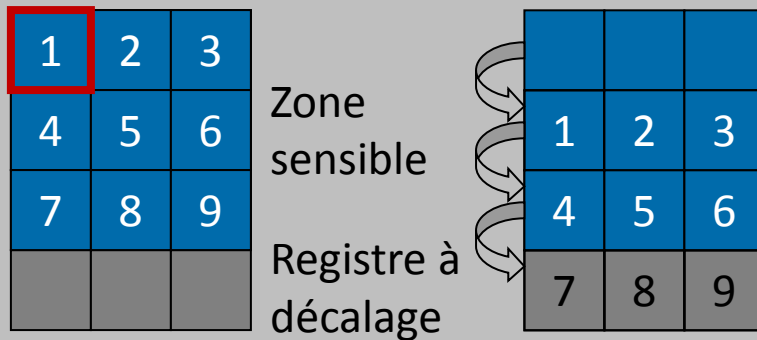
- Définition
  - CCD : Charge-Coupled Device
  - Dispositif à Transfert de Charges (DTC)
- Principe de fonctionnement
  - Trois étapes se succèdent :
    - ♦ L'intégration (conversion photon – électron)
    - ♦ Le transfert
      - ♦ Transfert parallèle-série
      - ♦ Transfert de trames
      - ♦ Transfert interlignes
    - ♦ L'amplification (conversion électron – tension)

# Le capteur CCD

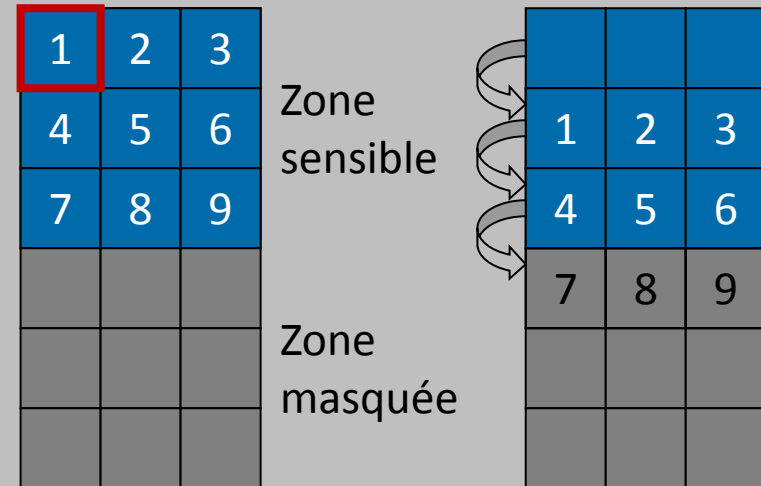
- Modes de transfert
  - Transfert parallèle-série : les cellules de la matrice sont couplées verticalement et toutes les lignes verticales sont transférées en parallèle dans un registre à décalage.
  - Transfert de trames : c'est un transfert ligne par ligne vers une zone équivalente mais protégée de la lumière par un film opaque.
  - Transfert interligne : la zone de transfert se trouve cette fois entre les colonnes. Quelques microsecondes suffisent pour déplacer les charges. Pendant le transfert, une nouvelle étape d'intégration peut commencer. Cette technologie est utilisée pour des applications nécessitant des temps d'intégration faible comme des scènes en mouvement.

# Le capteur CCD

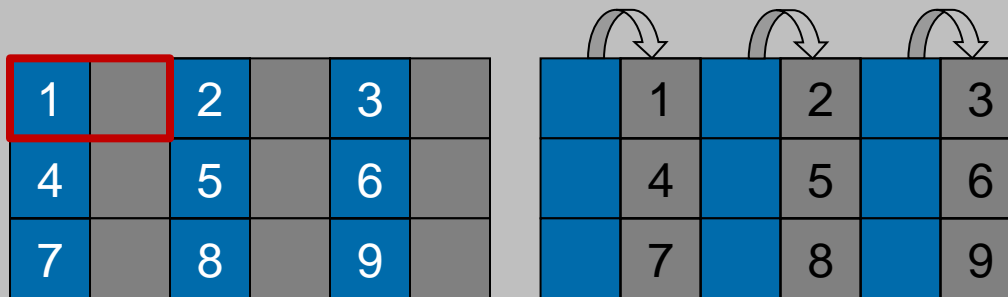
## • Modes de transfert



*Le transfert parallèle-série*



*Le transfert de trames*



*Le transfert interligne*

- Caméras progressives
  - ◆ Image pleine trame
- Caméras entrelacées
  - ◆ Trames paire et impaire

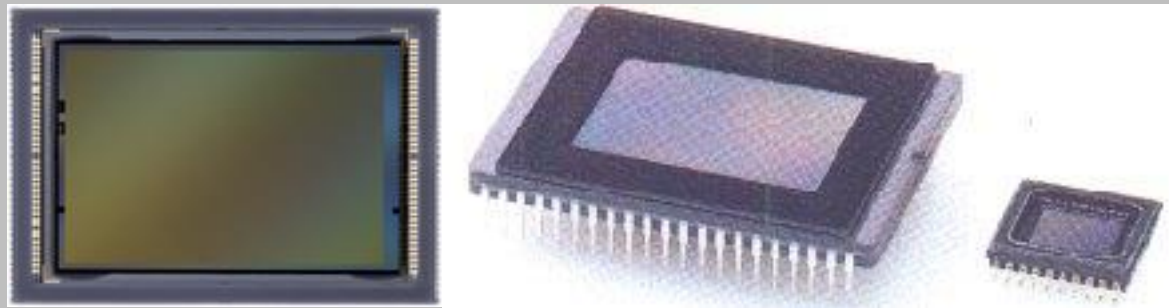


# Le capteur CCD

- Capteurs multivoies
  - Afin de diminuer le temps de transfert, notamment pour les capteurs à haute résolution, des architectures multivoies ont été développées (capteur « multi-taps »)
  - La surface photosensible est divisée en plusieurs parties, chacune assurant simultanément le transfert des charges et la conversion électron-tension vers des sorties indépendantes.
  - L'inconvénient de cette technique réside dans le fait que les différentes parties ne répondent pas exactement de la même manière à un même signal lumineux, ce qui nécessite un calibrage.

# Le capteur CMOS

- Définition
  - CMOS : Complementary Metal Oxide Semi-conductor
- Principe de fonctionnement
  - Mêmes principes physiques que les capteurs CCD.
  - Ils utilisent une technologie CMOS standard moins coûteuse que les CCD.



*Capteur CMOS*

# Le capteur CMOS

- Grâce à des transistors MOS complémentaires placés sur chaque photosite et fonctionnant comme des interrupteurs, la conversion « électron-tension » est effectuée au niveau de chaque photosite.
- Grâce à l'intégration supplémentaire d'une logique d'amplification et d'obturation, l'image acquise est convertie immédiatement en information numérique contrairement au CCD qui doit convertir l'information analogique pour devoir la convertir par la suite en information numérique.
- L'électronique directement intégrée sur le capteur génère un bruit supplémentaire, diminue la surface photosensible et réduit donc la sensibilité.

# Le capteur CMOS

- Modes d'exposition
  - Rolling shutter : le début de l'exposition de chaque ligne successive du capteur est légèrement décalé. Ce décalage entraîne des déformations dans les images d'objets en mouvement.
  - Global shutter : toutes les cellules du capteur sont exposées en même temps.

# Comparaison CCD / CMOS

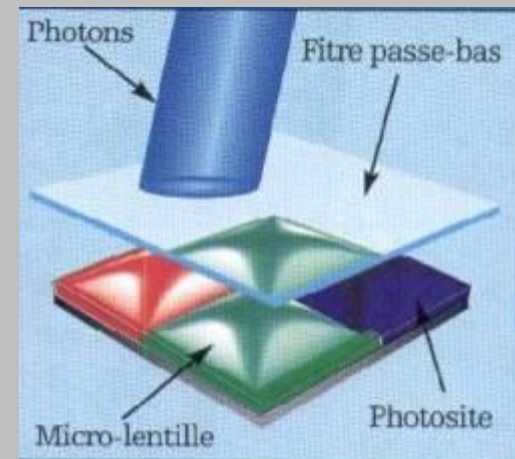
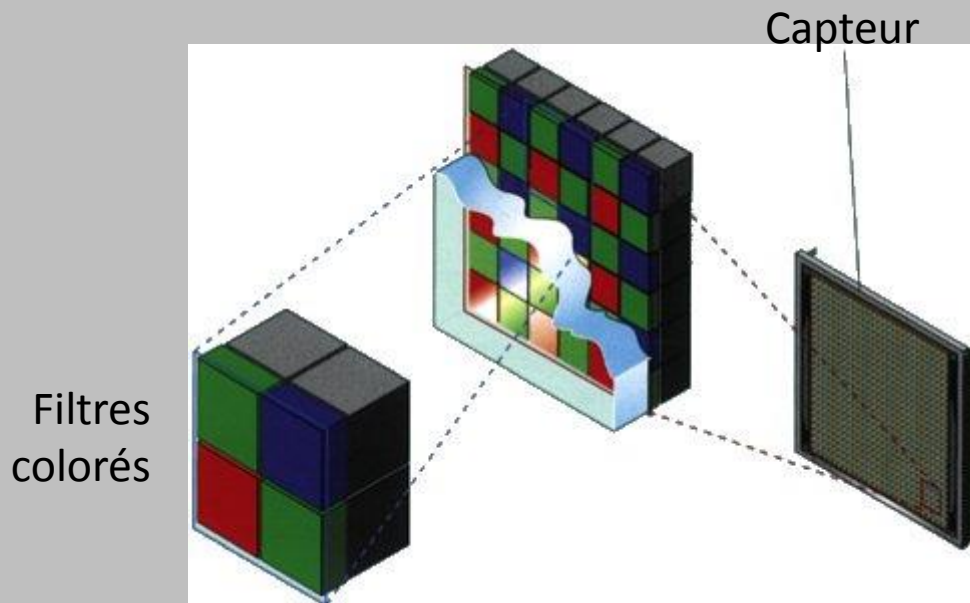
	CCD	CMOS
Avantages	<ul style="list-style-type: none"><li>• Qualité d'images élevée</li><li>• Bruit très faible</li><li>• Haute sensibilité</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Possibilité de lire des zones de la matrice (fenêtrage)</li><li>• Compact</li><li>• Faible consommation</li><li>• Faible coût</li></ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"><li>• Saturation à haute luminosité</li><li>• Pas de possibilité de fenêtrage</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bruit</li><li>• Peu sensible à faible luminosité</li></ul>

# Monochrome ou couleur ?

- Applications couleur
  - Elles restent minoritaires
    - ◆ Contrôle et tri alimentaire
    - ◆ Inspection des surfaces de matériaux
- Type de caméras
  - Caméras couleur mono-capteur
  - Caméras couleur tri-capteur
  - Caméras monochromes et lumière colorée
  - Caméras multispectrale, IR, UV...

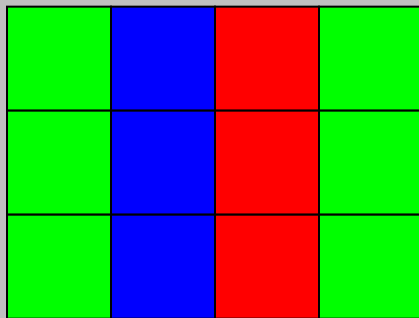
# Les caméras mono-capteur

- Principe
  - Réseau de filtres colorés entrelacés sur les photosites d'un capteur :

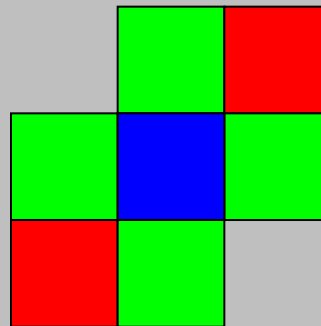


# Les caméras mono-capteur

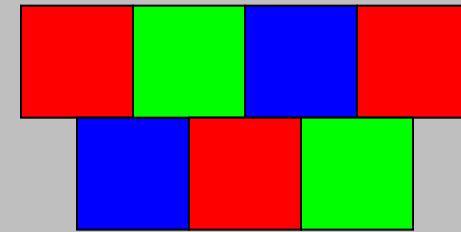
- Différents réseaux de filtres



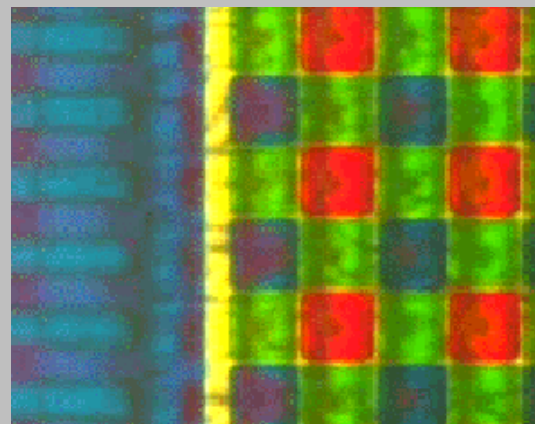
*Filtre colonne*



*Filtre de Bayer*



*Filtre de Rockwell*

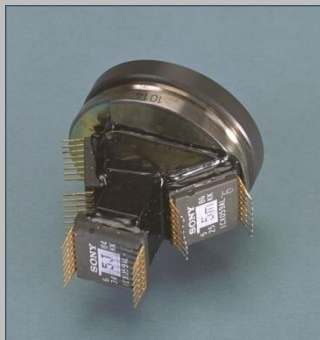


*Réseau de filtre de Bayer réel*

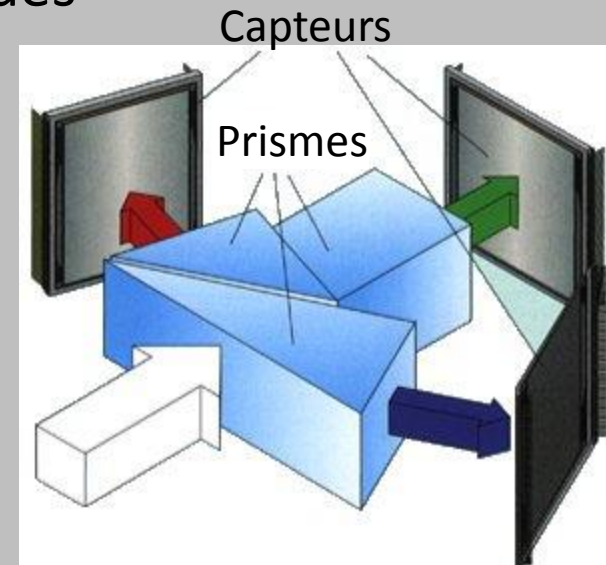


# Les caméras tri-capteurs

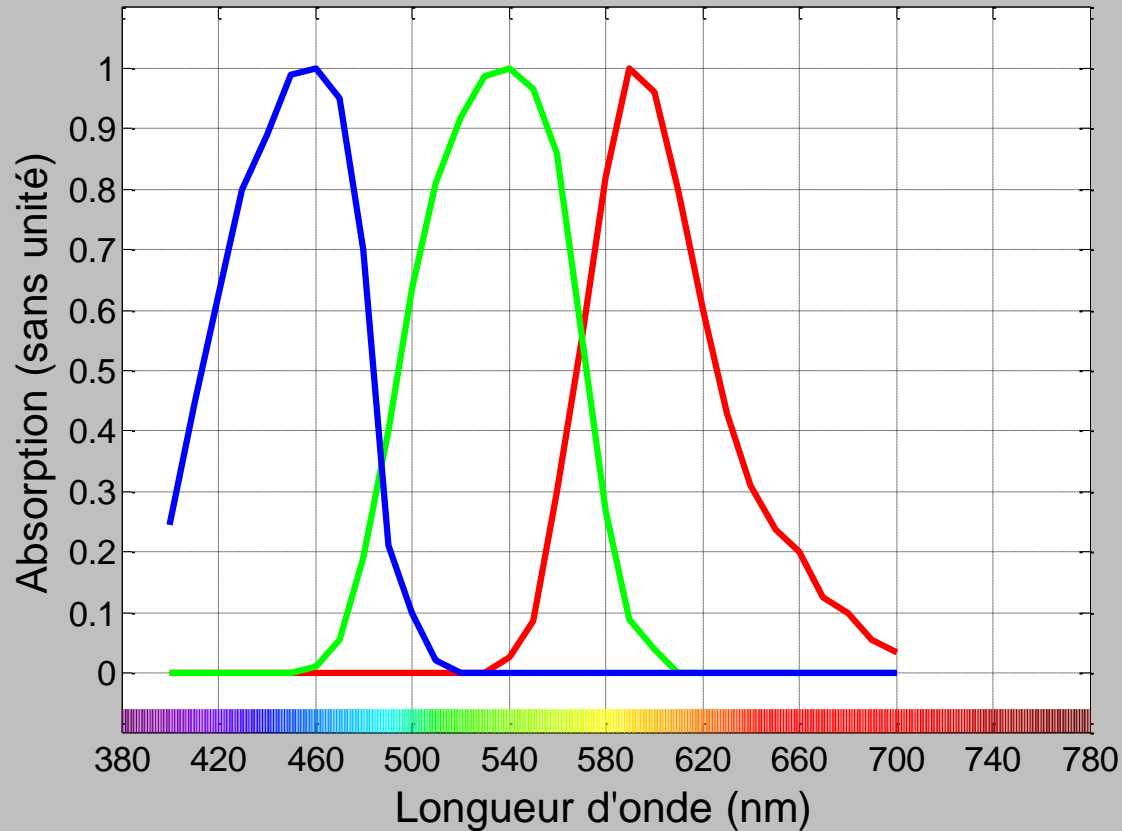
- Principe
  - Trois capteurs
  - Système à base de prismes et de filtres dichroïques permettant de répartir la lumière selon des longueurs d'ondes courtes, moyennes et grandes



*Capteur tri-CCD*



# Réponses spectrales

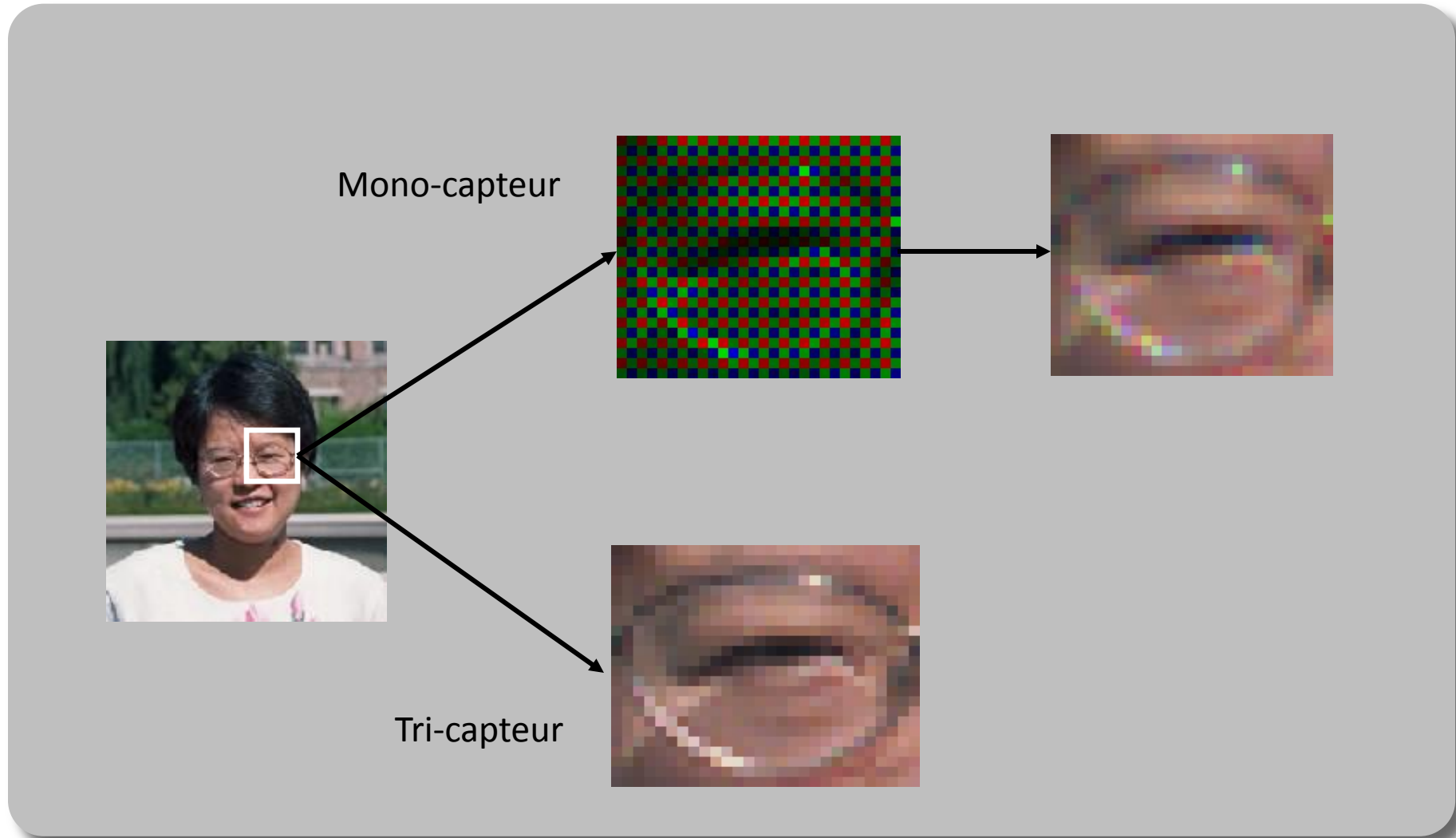


*Sensibilité spectrale de la caméra tri-CCD Sony DXC-755P*

# Comparaison mono-capteur / tri-capteur

	Mono-capteur	Tri-capteur
Avantages	<ul style="list-style-type: none"><li>• Prix</li><li>• Taille du capteur</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pas de perte de résolution</li><li>• Pas d'aberrations chromatiques</li></ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"><li>• Perte de résolution nécessitant des technique d'interpolation (dématriçage)</li><li>• Aberrations chromatiques</li><li>• Gamut</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Prix élevé</li><li>• Gamut</li></ul>

# Comparaison mono-capteur / tri-capteur



# Balance des blancs

- Problématique
  - Un objet blanc (ou noir) dans la scène réelle doit donner un objet blanc (ou noir) dans l'image correspondante indépendamment de l'éclairage afin d'obtenir un rendu correct des couleurs.
  - Nécessité d'ajuster les composante rouge, verte et bleue les unes par rapport aux autres afin qu'un blanc de référence corresponde aux valeurs maximales des composantes couleur.
  - Cette opération est appelée la **balance des blancs** et peut être réalisée manuellement ou automatiquement en agissant sur les gains.

# Analogique, numérique ou intelligente ?

- Image numérique
  - L'image, telle qu'elle est manipulée par l'ordinateur, est un ensemble de données numériques résultant de la conversion d'un ou de plusieurs signaux vidéos délivrés par le capteur.
  - La numérisation de ces signaux consiste en une opération d'échantillonnage et de quantification.
  - L'image numérique est une matrice de points images appelés « pixels » (picture elements).
- Echantillonnage
  - C'est l'opération qui permet de revenir à la représentation capteur en prélevant au signal le nombre d'échantillons nécessaires à intervalles réguliers.

# Analogique, numérique ou intelligente ?

- Quantification

- C'est l'opération qui consiste à coder sous forme binaire les valeurs prélevées lors de l'échantillonnage. Le signal ainsi quantifié est une suite de valeurs numériques manipulables par le processeur.
- La quantification consiste à spécifier le nombre de bits nécessaires (en général 8 bits) pour représenter le signal
  - ◆ 1 bit => 2 niveaux : 0 (noir), 1 (blanc) (image binaire)
  - ◆ 2 bits => 4 niveaux :  $(0)_{10} = (00)_2$  (noir),  $(1)_{10} = (01)_2$  (gris foncé),  $(2)_{10} = (10)_2$  (gris clair),  $(3)_{10} = (11)_2$  (blanc)
  - ◆ 8 bits => 256 niveaux : 0 (noir), ..., 255 (blanc)
  - ◆ 12, 16, 32 bits...
  - ◆ N bits =>  $2^N$  niveaux : 0 (noir), ...,  $2^N - 1$  (blanc)

# Analogique, numérique ou intelligente ?

- Taille des images

- C'est le nombre de bits nécessaires à son codage

- ◆ Image noir et blanc  $256 \times 256$  codée sur 8 bits => 65 536 octets = 64 ko
- ◆ Image noir et blanc  $512 \times 512$  codée sur 8 bits => 256 ko
- ◆ Image noir et blanc  $512 \times 512$  codée sur 12 bits => 384 ko
- ◆ Image couleur  $512 \times 512$  codée sur 8 bits => 768 ko
- ◆ Taille d'une image **en octet**, avec :
  - $N_{pixel}$ , nombre de pixels
  - $N_{codage}$ , niveau de quantification
  - $N_{couleur}$  :
    - 1 si image monochrome
    - 3 si image couleur

$$Taille = \frac{N_{pixel} \times N_{codage} \times N_{couleur}}{8}$$



# Caméra analogique

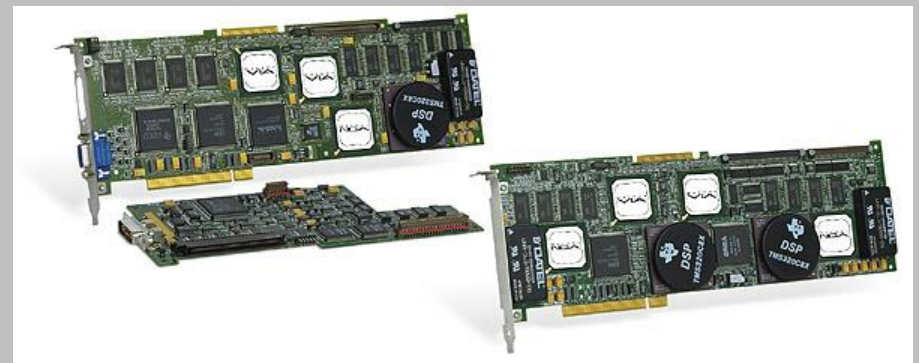
- Elle délivre un signal analogique (monochrome ou couleur).
- Elle nécessite donc d'utiliser une carte d'acquisition afin d'obtenir une image numérique.
- Le signal vidéo répond souvent à différentes normes de télévision analogiques mais peut être également non standard :
  - 1 canal : signal monochrome ou couleur composite généré par modulation
  - 2 canaux : luminance et chrominance sont séparées (norme S-VHS)
  - 3 canaux R, V et B



*Une caméra analogique*

# Carte d'acquisition

- Rôle des cartes d'acquisition (frame grabber)
  - Le multiplexage des entrées
  - La numérisation du signal pour les caméras analogiques
  - Parfois certains (pré-)traitement
  - Le stockage de l'image en mémoire
  - Le transfert des images
  - L'affichage
  - La gestion des entrées/sorties



*Cartes d'acquisition*

# Carte d'acquisition

- Autres entrées / sorties
  - Entrées
    - ◆ Triggers
    - ◆ Encodeurs (codeur incrémental)
    - ◆ Entrées utilisateurs TTL ou opto-couplés
  - Sorties
    - ◆ Stroboscope
    - ◆ Sorties utilisateurs TTL ou opto-couplés

# Carte d'acquisition

- « Look-Up Table » (LUT)
  - Table de transformation stockée dans des mémoires additionnelles
  - Le niveau du pixel est alors pris comme un indice d'entrée de la table et la valeur correspondante est transférée dans la mémoire image, ce qui permet un gain de temps comparativement à un calcul.
  - Quelques opérations élémentaires plus complexes peuvent également être programmées sur la carte (correction d'éclairage, décalage spatial...).

# Caméra numérique

- L'image est numérisée par la caméra.
- Toutefois, une carte d'acquisition peut être utilisée pour effectuer d'autres opérations (stockage des images en mémoire, gestion des entrées/sorties) ou pour transférer les données.
- Le traitement est réalisé par la carte ou le PC.

# Interfaces numériques

- Le transfert
  - Standards numériques
    - ◆ Numérique – parallèle : LVDS, RS-422
    - ◆ USB (Universal Serial Bus) et USB3 Vision
    - ◆ IEEE 1394 (FireWire)
    - ◆ CameraLink
    - ◆ Gigabit Ethernet et GigE Vision
    - ◆ CoaxPress
  - Performances
    - ◆ Les performances en débit peuvent être améliorées par l'utilisation de plusieurs câbles ou de la fibre optique.
    - ◆ L'utilisation de la fibre optique permet d'augmenter les longueurs de câble.

# Interfaces numériques

Format	Débit théorique (Gbits/s)	Longueur de câble (m)
<b>USB</b>	0,48 (2.0) 5 (3.0)	5
<b>IEEE 1394 (Firewire)</b>	0,4 (1394a) 0,8 (1394b)	4,5 (1394a) 100 (1394b)
<b>Camera Link</b>	2 (Base)	10 (Base)
<b>GigE Vision</b>	1	100
<b>CoaxPress</b>	1,25 (CXP-1) 3,125 (CXP-3) 6,25 (CXP-6)	105 (CXP-1) 85 (CXP-3) 35 (CXP-6)

*Les interfaces numériques (transfert avec un seul câble)*

# Caméra intelligente

- Le traitement est réalisé par la caméra.
- Il n'y a plus de cartes d'acquisition.



*Une caméra intelligente*



# Caméra intelligente

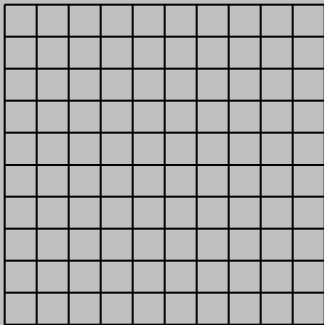
- Système de vision compact (ou automate de vision)
  - Le microprocesseur destiné à des opérations de traitement d'images est séparé de la caméra, ce qui permet de connecter plusieurs caméras sur un même système, comme dans les systèmes à base PC, ainsi que les différentes entrées/sorties.

## Matricielle ou linéaire ?

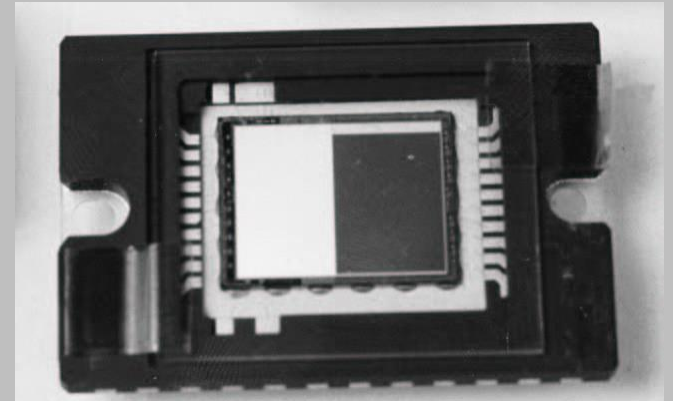
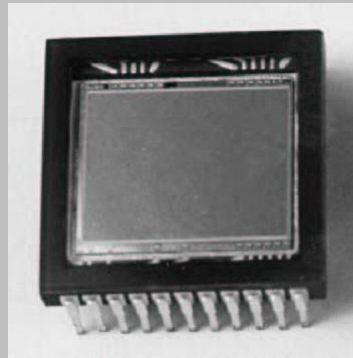
- L'organisation des éléments photosensibles sur le capteur conduit à définir deux types de caméras :
  - les caméras matricielles (area-scan cameras) et
  - les caméras linéaires (line-scan cameras).

# Les caméras matricielles

- Area-scan camera
  - Les éléments photosensibles sont organisés en matrice



*Matrice*



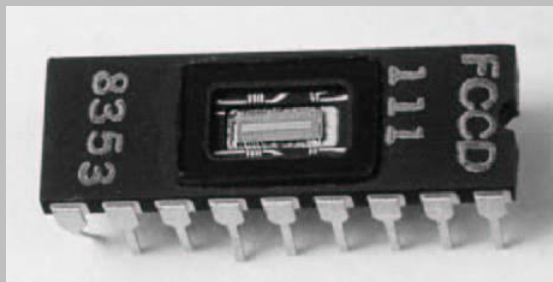
*Capteurs matriciels*

# Les caméras matricielles

- Modes d'acquisition
  - Synchrones (Live Video)
    - ◆ Les images sont acquises en séquence au rythme de la fréquence image.
  - Asynchrone (Snapshot)
    - ◆ L'acquisition des images est déclenchée par un signal externe (**trigger**) relié à la carte d'acquisition ou directement à la caméra.

# Les caméras linéaires

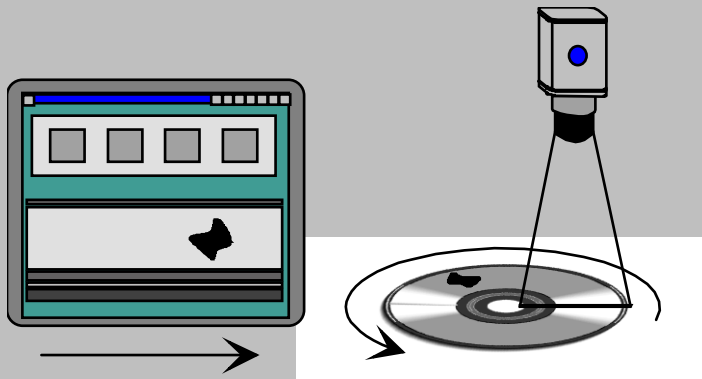
- Line-scan camera
  - Correspond à une seule ligne d'un capteur matriciel
  - Utilise le principe du scanner, photocopieur ou fax
  - Permet une haute résolution (de 2000 à 16000 pixels)
  - Permet des fréquences d'acquisition très élevées (fréquence pixel de 1 à 40 Mhz sur plusieurs voies)



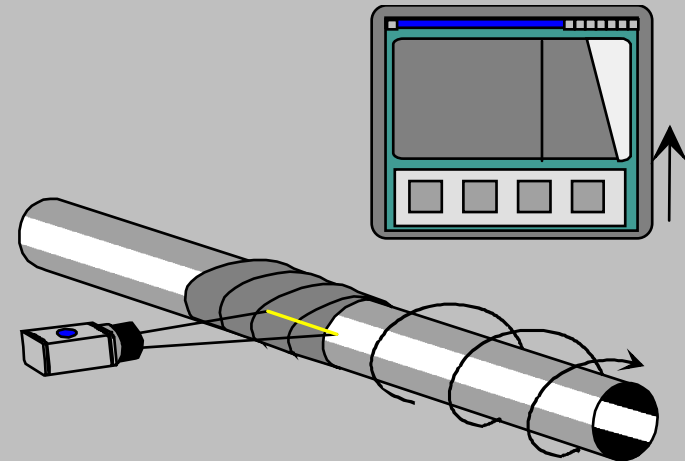
*Capteurs linéaires*

# Les caméras linéaires

- Type d'application
  - Produit en défilement continu (tôle, verre plat, textile, papier, bois,...),
  - Produit de forme circulaire ou cylindrique,
  - Produit de grande dimension.

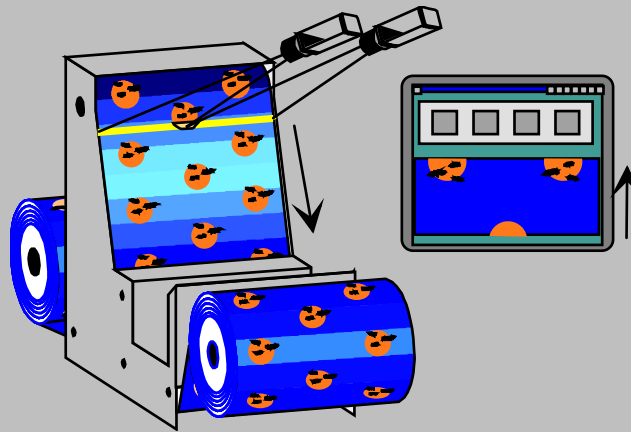


*Développé d'un disque*

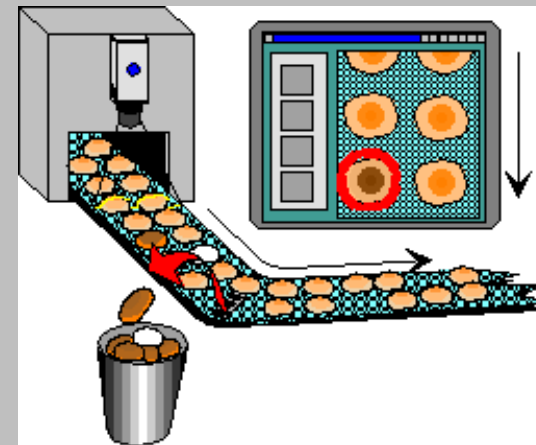


*Développé d'un cylindre*

# Les caméras linéaires



*Contrôle de produit en défilement continu*



*Contrôle d'objets en continu*

# Les caméras linéaires

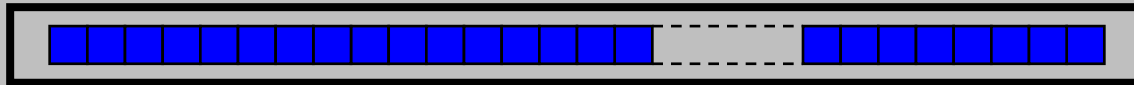
- Modes d'acquisition
  - Synchrone (Web)
    - ◆ Les images-lignes sont acquises successivement et stockées dans la mémoire de la carte d'acquisition en nombre fini.
  - Asynchrone
    - ◆ L'acquisition des images-lignes est déclenchée et éventuellement stoppée par un signal externe (trigger). Les images-lignes successivement acquises sont stockées dans la mémoire de la carte d'acquisition.



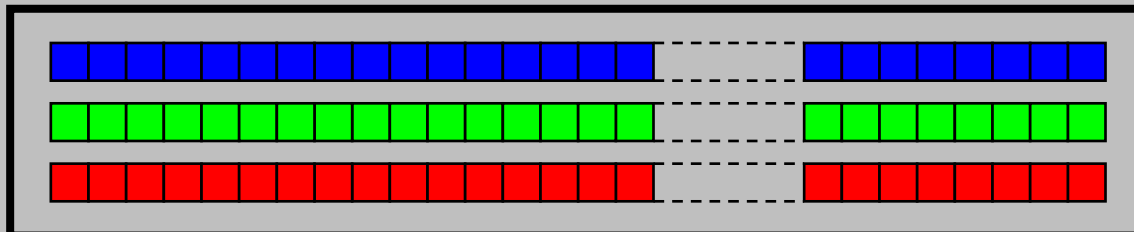
# Les caméras linéaires

- Caméra linéaire couleur

- Caméra tri-capteur



- Caméra trilinéaire : problème de décalage spatial

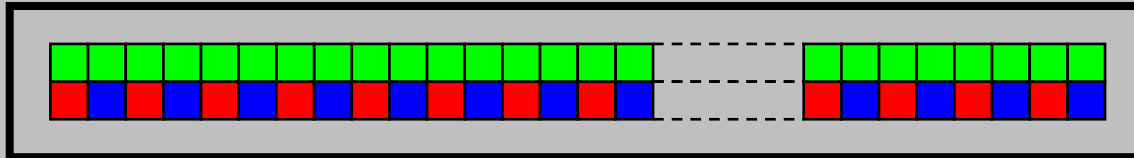


# Les caméras linéaires

- Caméra linéaire couleur
  - Caméra linéaire mono-capteur



- Caméra bilinéaire mono-capteur



# Quelques fabricants de caméras

- Atmel
- Basler
- Dalsa
- I2S
- JAI - Pulnix
- Lord Ingénierie
- Tattile
- Toshiba - Teli
- Sony



# Cartes et caméras intelligentes

- Bitflow
- Cognex
- Data translation
- Euresys
- I2S
- Matrox
- National Instrument



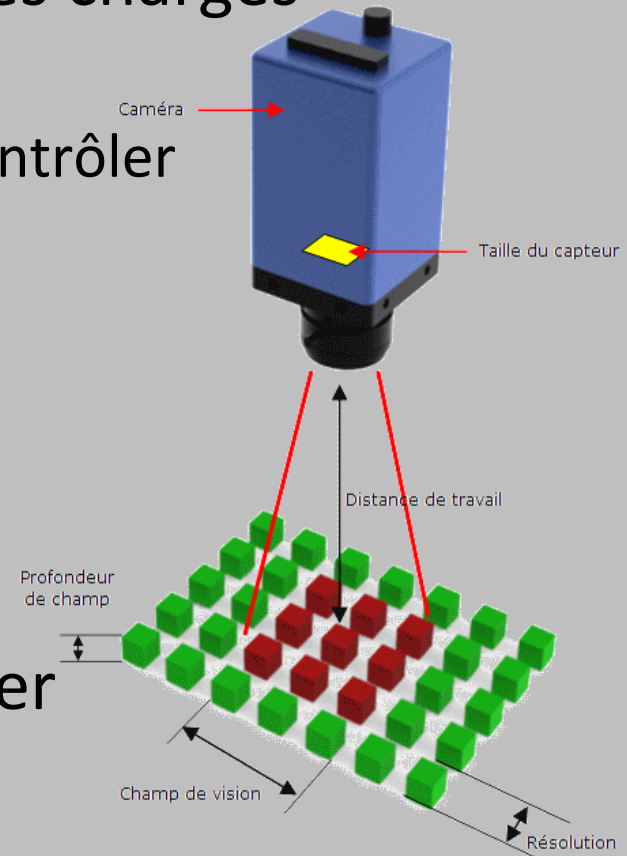
# Vision industrielle

## Dispositif de capture d'image

### Caméras matricielles

# Choix d'une caméra matricielle

- Données quantitatives du cahier des charges
  - Taille du plus petit élément à observer
  - Dimensions maximales des objets à contrôler
  - Vitesse de défilement des objets
- Paramètres à calculer
  - Résolution du capteur
  - Temps d'exposition
  - Fréquence d'acquisition des images
- Autres caractéristiques à déterminer
  - Sensibilité du capteur
  - Taille du capteur



# Choix d'une caméra matricielle

- Précision
- Champ de vision
- Résolution
- Temps d'exposition
- Fréquence image

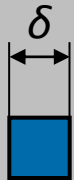
# Définition

- Précision ou **résolution spatiale**
  - La **précision** ou **résolution spatiale** d'un système de vision représente la distance (en millimètre) observée par 1 pixel dans une direction donnée.
  - La précision  $P$  est définie en fonction de la taille  $\delta$  du plus petit élément à observer (ou à détecter).
  - Le choix d'une caméra matricielle dépend de la précision  $P$  souhaitée. Plus l'application demande de la précision (pour un  $\delta$  donné), plus la **résolution**  $R$  (**nombre de pixels** du capteur ou **définition**) doit être grande.

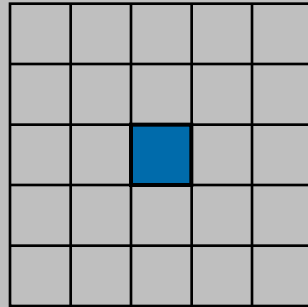


# Facteur de sécurité

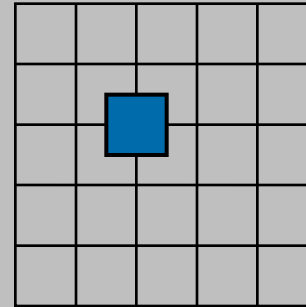
- Afin d'assurer une bonne perception visuelle, on impose un **facteur de sécurité**  $S$  au moins égal à 2 (théorie de Shannon).



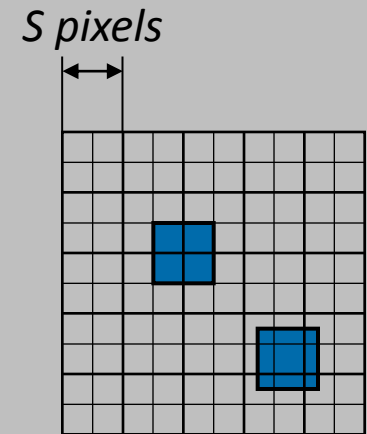
Plus petit élément  
à observer



Cas idéal



Cas critique



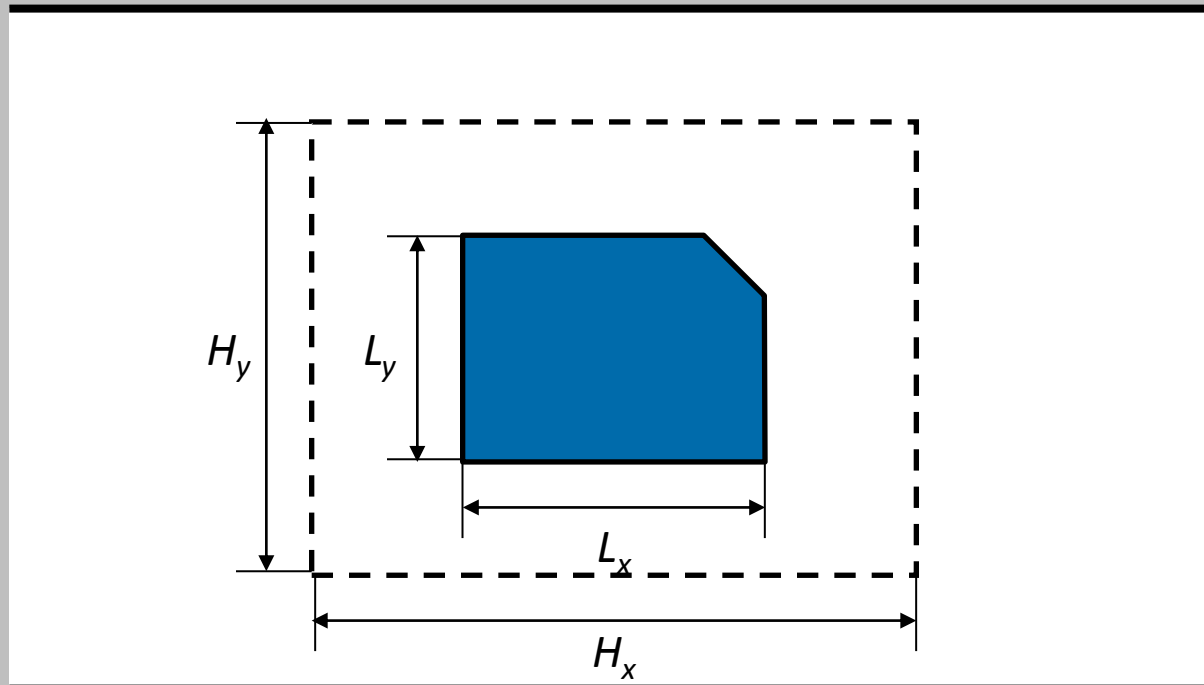
Facteur de sécurité

$$\Rightarrow P = \frac{\delta}{S}$$

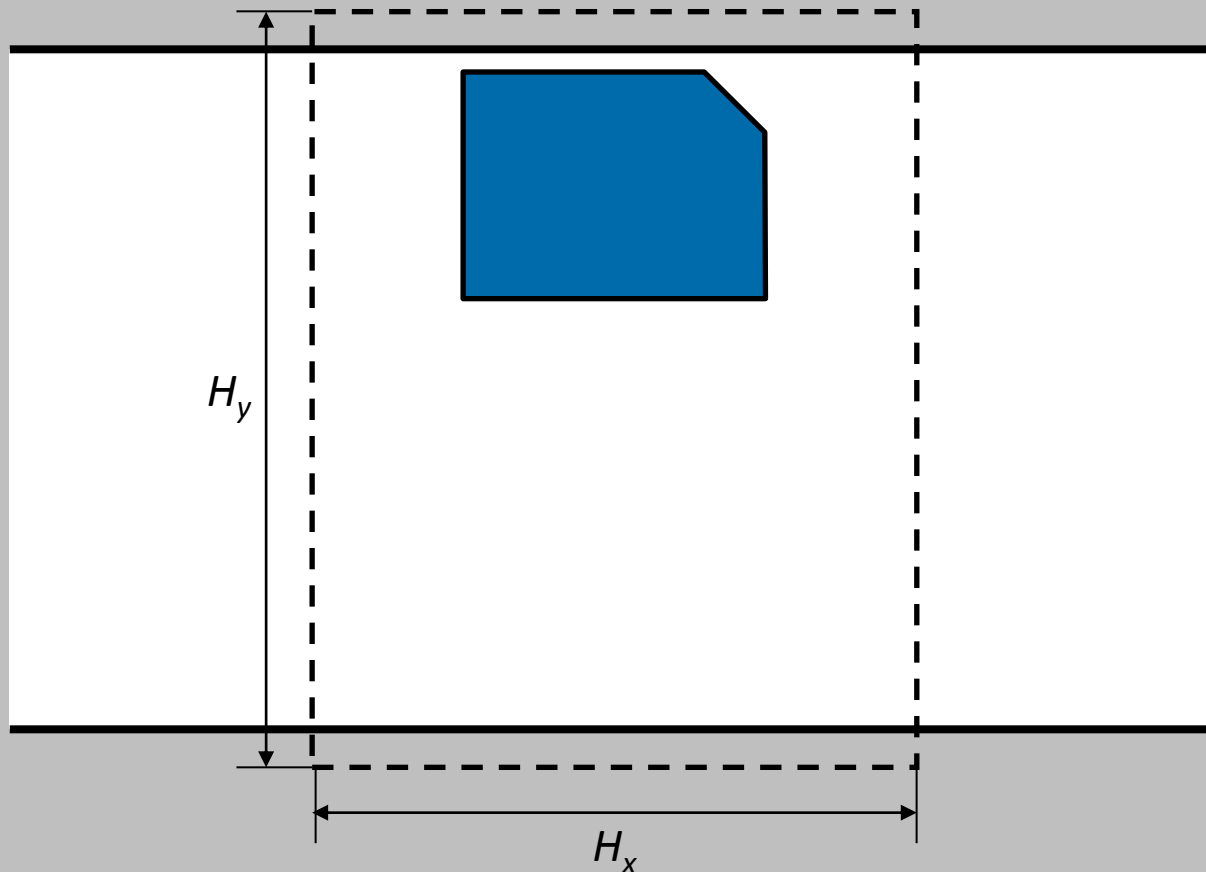
# Définition

- Le **champ de vision** est la surface  $H_x \times H_y$  observée par le capteur.
- Il dépend de :
  - Longueur et largeur maximale  $L_x \times L_y$  des objets à contrôler toute série confondue,
  - Marges supplémentaires si nécessaire,
  - Nombre, position et orientation des objets.

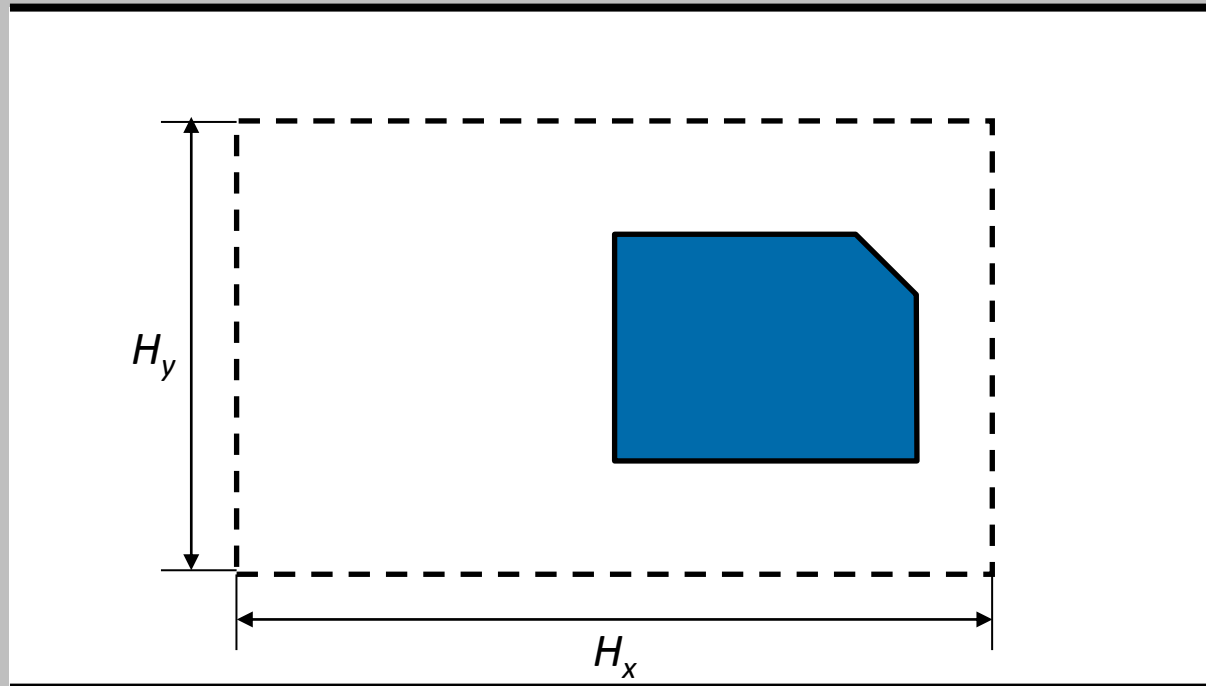
# Définition



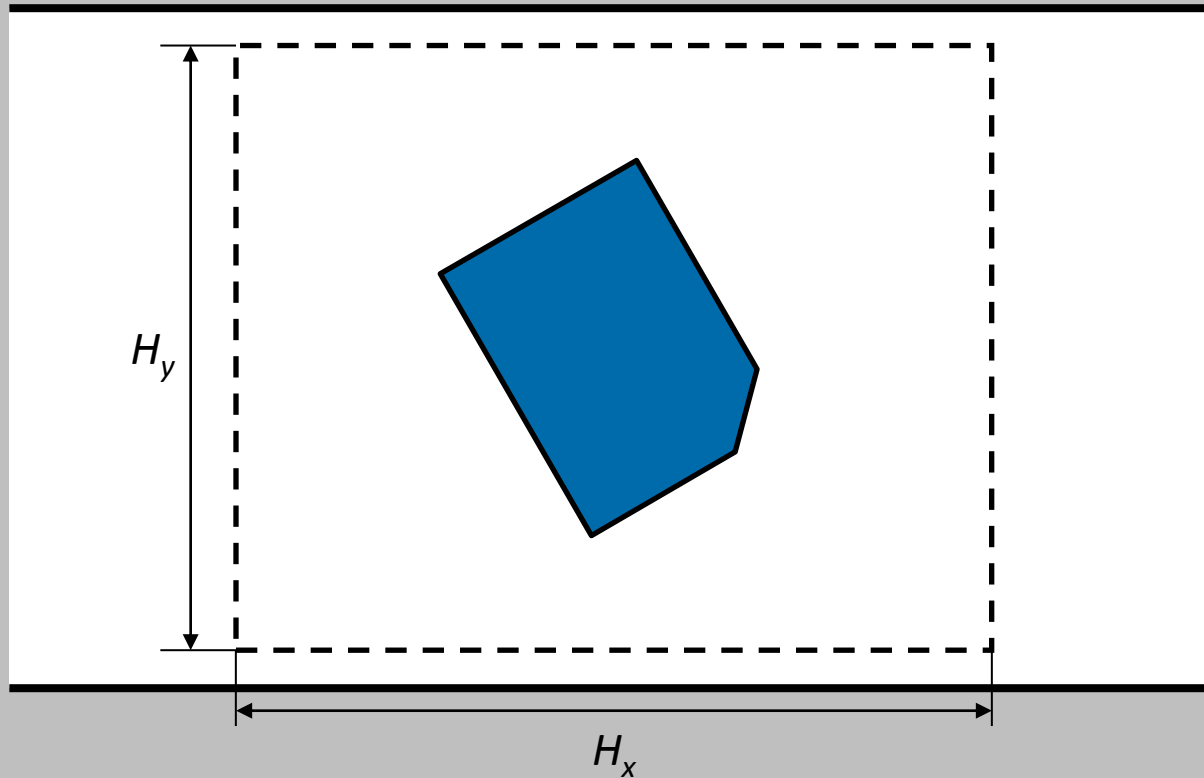
# Translation verticale



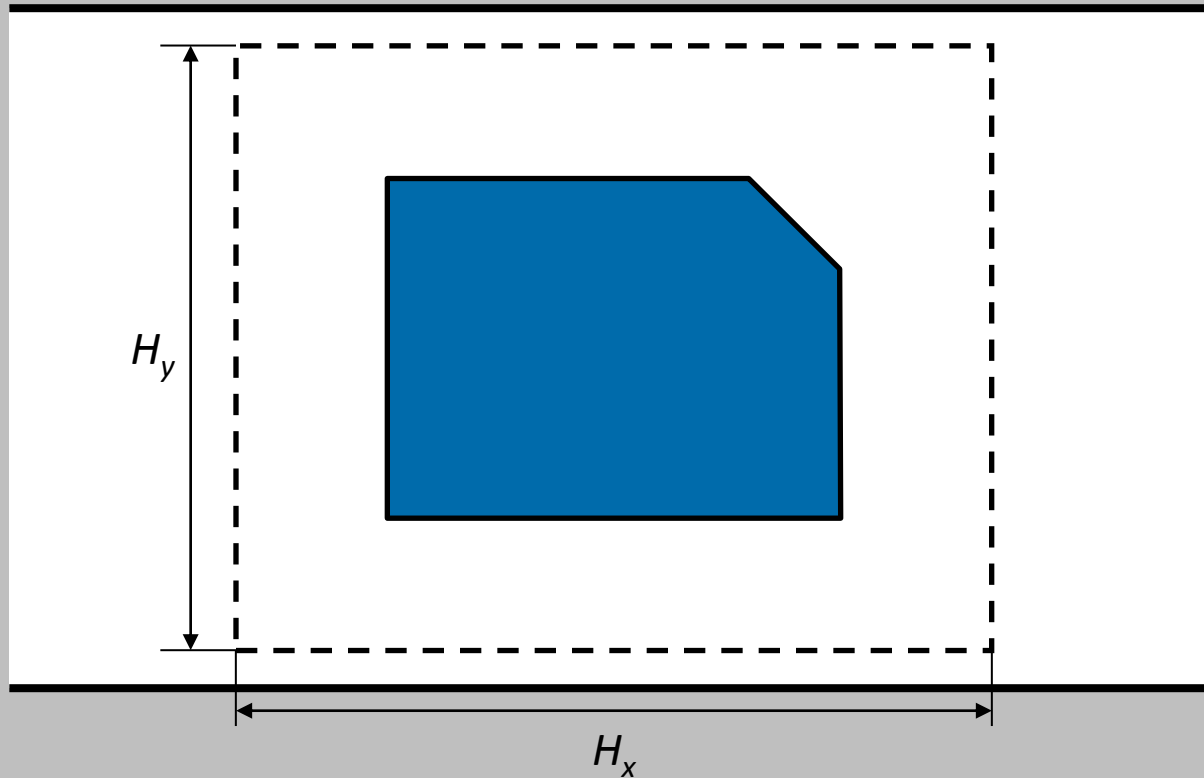
# Translation horizontale



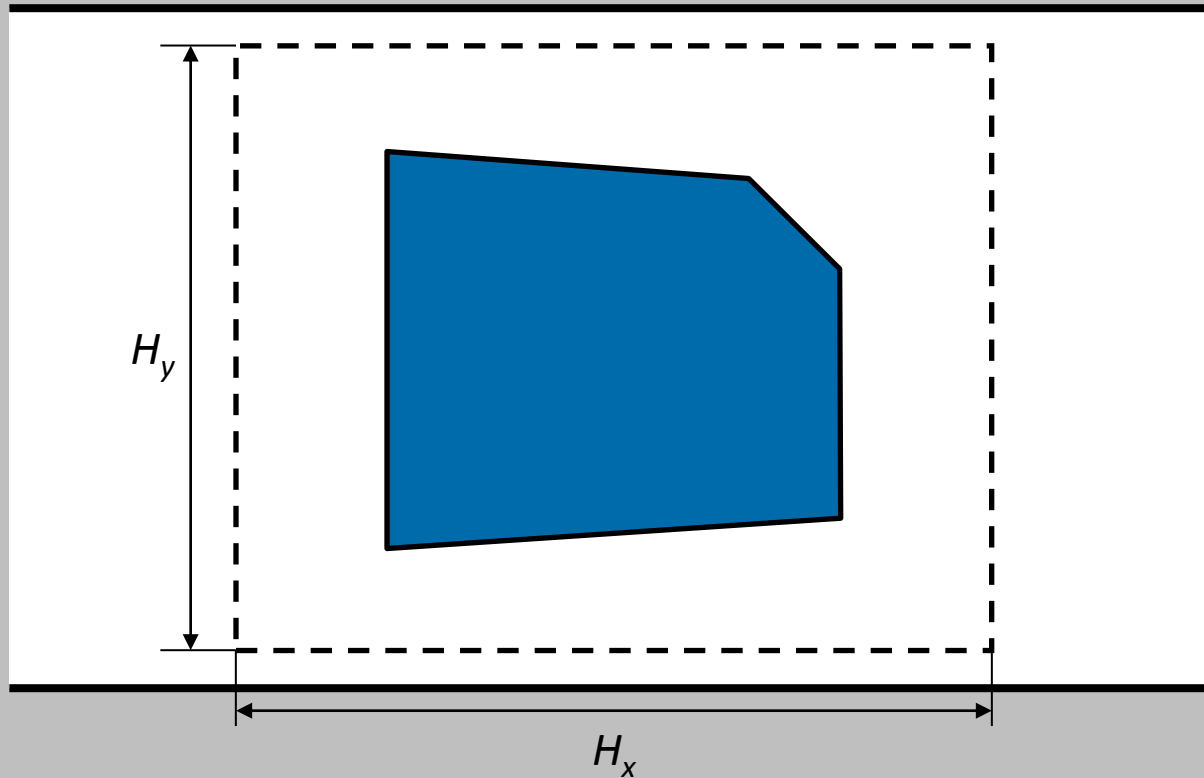
# Rotation



# Homothétie

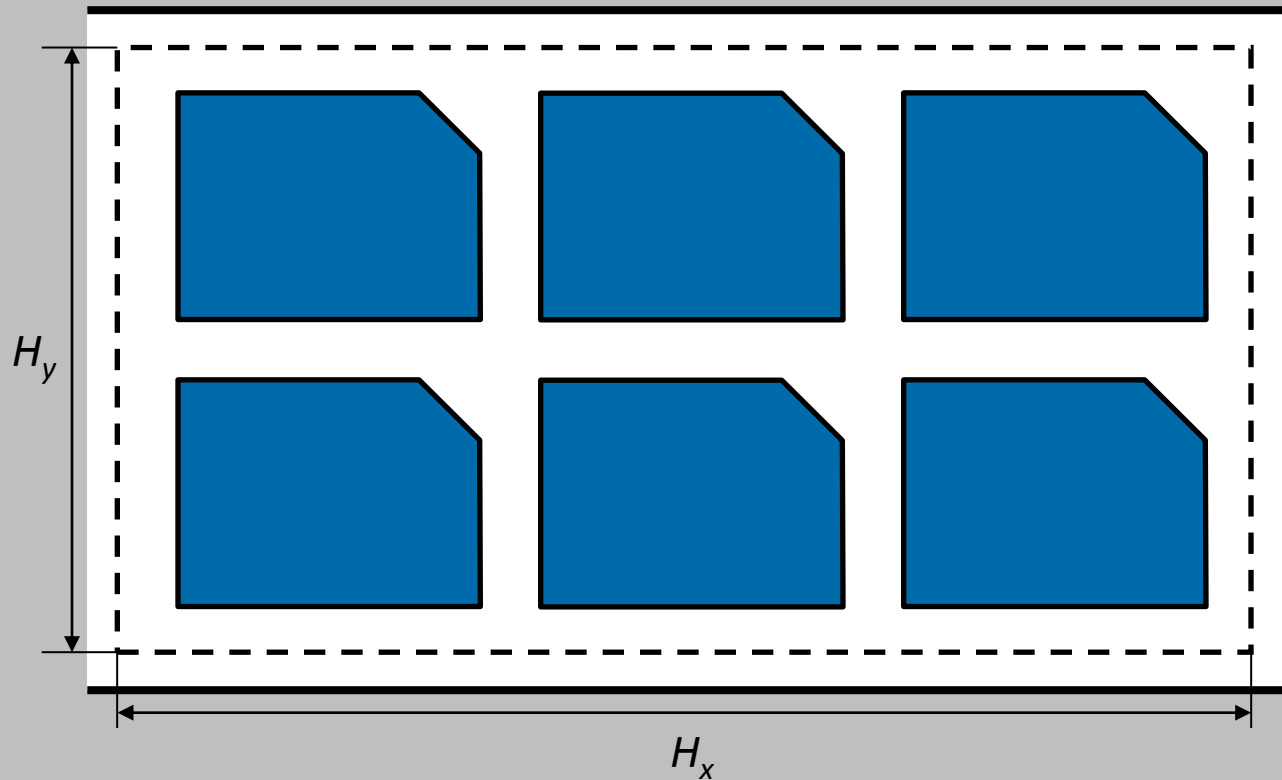


# Perspective





# Quantité



# Calcul de la résolution

- Principaux paramètres dimensionnels à prendre en compte
  - Résolution du capteur,  $R_x \times R_y$
  - Le champ à visualiser,  $H_x \times H_y$
  - Taille du plus petit élément à visualiser,  $\delta_x \times \delta_y$
  - Facteur de sécurité,  $S$

# Calcul de la résolution

- Règle de proportionnalité (produit en croix, règle de trois)

$$H \text{ (mm)} \rightarrow R \text{ (pixel)}$$

$$\delta \text{ (mm)} \rightarrow S \text{ (pixel)}$$

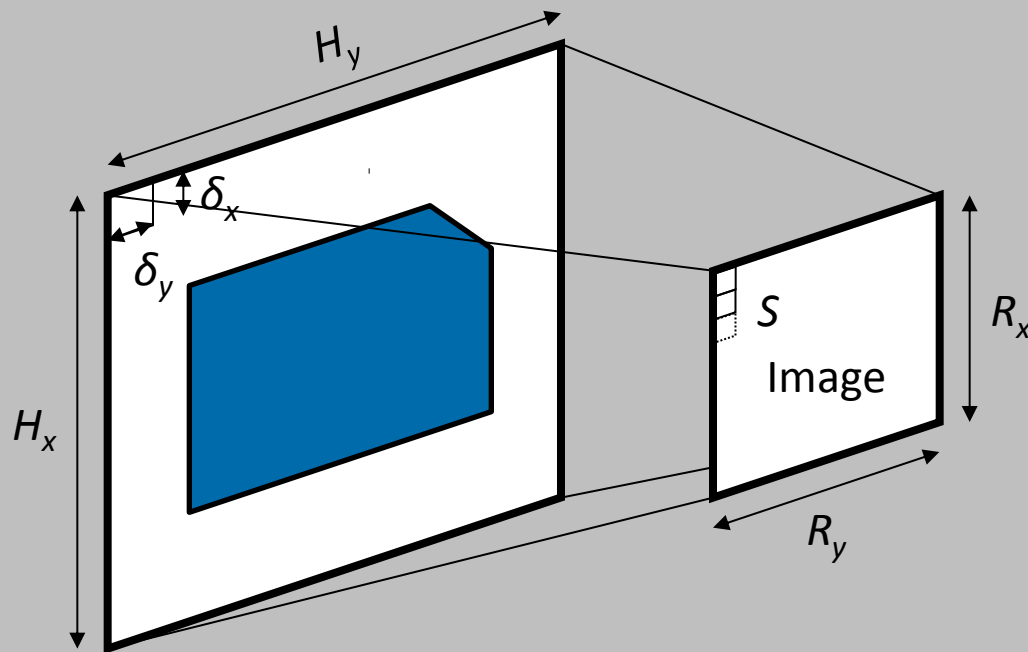
$$P \text{ (mm)} \rightarrow 1 \text{ (pixel)}$$

$$\Rightarrow H \times S = \delta \times R$$

$$\Rightarrow H = P \times R$$

$$\Rightarrow R = \frac{S \times H}{\delta}$$

$$\Rightarrow R = \frac{H}{P}$$



# Calcul de la résolution

- Remarques
  - La résolution doit être déterminée dans les deux directions (horizontale et verticale).
  - Généralement, la précision souhaitée selon l'axe des abscisses est identique à celle souhaitée selon l'axe de ordonnées :  $\delta_x = \delta_y = \delta$ .
  - La définition de la résolution conditionne le nombre de caméras, leurs positions et leurs orientations.
- Application numérique :
  - $\delta = 1 \text{ mm}$
  - $S = 3$
  - $H = 10 \text{ cm}$  et  $H = 1 \text{ m}$

# Produits en défilement continu

- Rappel
  - Nécessité d'exposer le capteur pendant un temps minimum
  - Si le capteur est exposé pendant un déplacement, il se crée alors un effet de flou de bougé dans l'image acquise
  - Exemple :

*Le véhicule se déplace de gauche à droite et d'arrière en avant.  
L'éclairage est **continu**.*



*Image statique*

# Produits en défilement continu



*Images du véhicule en déplacement sous un éclairage continu*

# Produits en défilement continu

- Pour éviter ce phénomène et afin d'obtenir une image nette, plusieurs solutions sont envisageables pour « geler » le mouvement de la pièce :
  - ◆ Ralentir ou arrêter le produit un bref instant pendant l'acquisition de l'image (flux discontinu), ce qui n'est pas toujours compatible avec les contraintes de cadence de production.
  - ◆ Réduire le temps d'intégration de la caméra, ce qui n'est pas toujours suffisant lorsque la vitesse de défilement est grande et la précision du système de vision est importante.
  - ◆ Utiliser un éclairage stroboscopique pour réduire la durée de l'exposition afin d'émettre un flash de lumière d'une durée très faible avec une intensité très forte.
  - ◆ Exemple : éclairage stroboscopique d'un véhicule en déplacement

# Eclairage stroboscopique



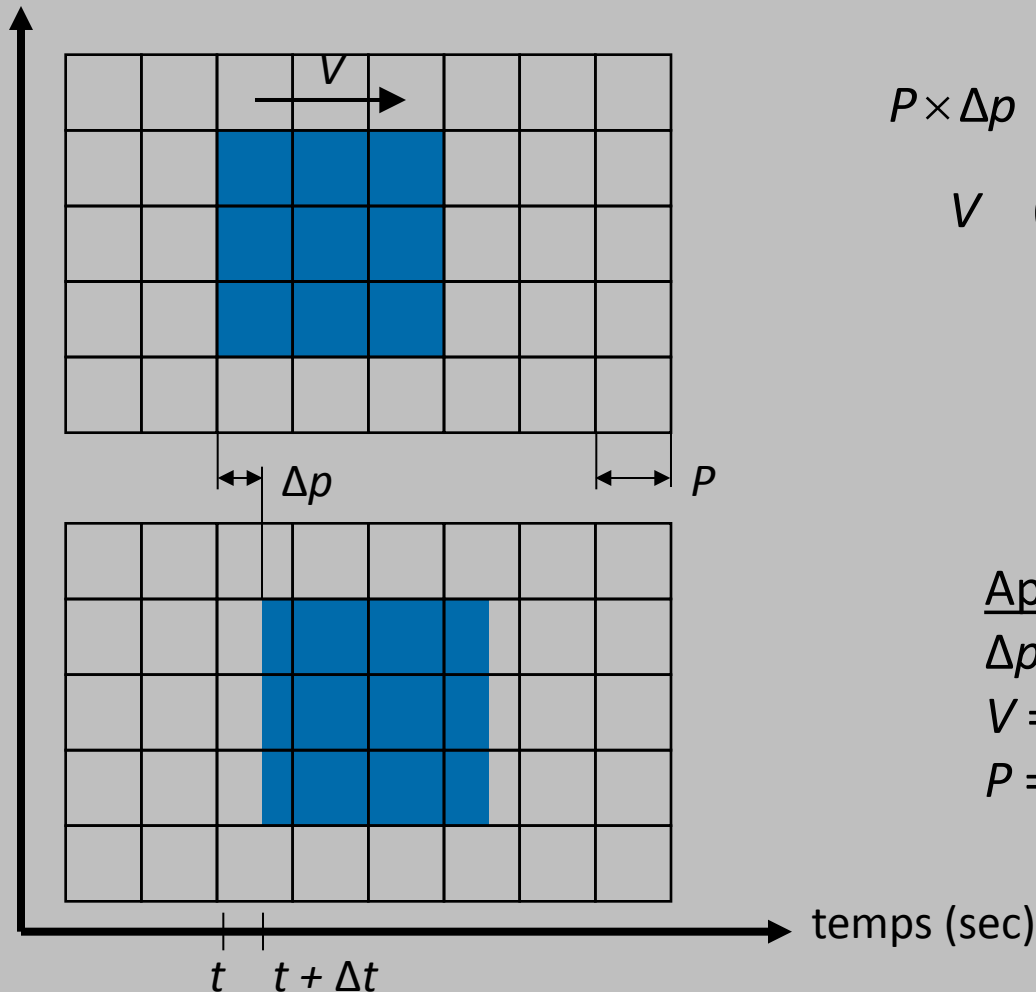
*Images du véhicule en déplacement sous un éclairage stroboscopique*



# Calcul du temps d'exposition

- Calcul du temps d'exposition maximum
  - Notations
    - ◆ Soit  $V$ , la vitesse de défilement du produit à inspecter.
    - ◆ Soit  $\Delta t$ , le temps d'exposition à ne pas dépasser garantissant une image nette.
    - ◆ Soit  $\Delta p$ , le seuil de perception du flou de bougé en pixel. Il définit le déplacement maximum du produit à inspecter en fonction de la précision  $P$  du système de vision, c'est à dire la taille  $\delta$  du plus petit élément observable par un pixel. En général  $\Delta p$  est compris entre  $1/2$  et  $1/5$  de pixel.
    - ◆ Cela signifie que le produit en défilement ne doit pas se déplacer de plus de  $\Delta p$  pixels pendant le temps  $\Delta t$ , soit en millimètres, de  $P \times \Delta p$  mm pour que l'image ne soit pas floue.

# Calcul du temps d'exposition



$$P \times \Delta p \text{ (mm)} \rightarrow \Delta t \text{ (sec)}$$

$$V \text{ (mm)} \rightarrow 1 \text{ (sec)}$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{P \times \Delta p}{V}$$

Application numérique :

$$\Delta p = 1/5,$$

$$V = 1 \text{ m/s},$$

$$P = 1 \text{ mm/pixel}.$$

# Calcul de la fréquence image

- Cadence de production maximale
  - Notations
    - ◆ Soit  $t$ , le temps séparant l'apparition de deux objets à contrôler (**temps de cycle**).  $t$  correspond alors au **temps disponible à l'acquisition et au traitement de l'image**.
    - ◆ Soit  $F$ , la fréquence d'acquisition des images :  $F = 1 / t$ .
    - ◆ Soit  $d$ , la distance séparant deux objets consécutifs.  
Pour une cadence de production maximale  $d$  est égale au **champ de vision de la caméra** dans la direction du déplacement.
    - ◆ Soit  $V$ , la vitesse de défilement

$$\begin{array}{l}
 d \text{ (mm)} \rightarrow t \text{ (sec)} \\
 V \text{ (mm)} \rightarrow 1 \text{ (sec)}
 \end{array}
 \Rightarrow V = \frac{d}{t}
 \quad \Rightarrow F = \frac{1}{t} = \frac{V}{d}$$

# Exercices

- Précision (résolution spatiale)
  - Quelles sont, en millimètres (mm), les dimensions  $H_x$  (en abscisse) et  $H_y$  (en ordonnée) du champ de vision que peut observer une caméra matricielle de résolution UXGA (1600×1200 pixels) si on souhaite obtenir une précision  $P=0,2$  mm/pixel ?
  - Quelle doit être la résolution d'un capteur matriciel permettant d'observer un champ de vision de longueur  $L=8$  cm et de largeur  $l=6$  cm sachant que l'on souhaite obtenir une précision permettant d'observer  $c=1$  mm sur  $S=10$  pixels ?

# Exercices

- Est-il possible d'observer une feuille de papier au format A4 (21 cm × 29,7 cm) avec une précision  $P=0,22$  mm/pixel en utilisant une caméra matricielle de résolution 1280×1024 ? Pourquoi ?
- Est-il possible d'inspecter un objet de longueur  $L=50$  cm et de largeur  $l=40$  cm en respectant une précision  $P$  telle que :  $P < 0,32$  mm/pixel en utilisant une caméra matricielle de résolution 1600×1200 ? Pourquoi ?
- Calculer la précision  $P$  d'un système de vision inspectant un objet de taille 5 cm x 5 cm avec un capteur matriciel de résolution 2048×1536 (format QSXGA) afin que la totalité de la surface de l'objet **soit entièrement vue** dans l'image acquise ?

# Exercices

- Temps d'exposition maximal
  - En supposant qu'un objet défilant sous une caméra matricielle ne doit pas se déplacer de plus d'un quart de pixel dans l'image pendant son acquisition pour que celle-ci ne soit pas floue, déterminer, en milliseconde (ms), le temps d'intégration  $t_i$  respectant cette condition si la précision du système est  $P=0,5$  mm/pixel et la vitesse de défilement est  $V=0,5$  m/s.

# Exercices

- Quelle est, en microseconde, le temps d'exposition  $t_{exp}$  à ne pas dépasser pour qu'un objet défilant à la vitesse  $V=1$  m/min apparaisse net dans l'image acquise par une caméra matricielle si on suppose que cet objet ne doit pas se déplacer de plus d'un cinquième de pixel pour ne pas apparaître flou dans l'image et que un cinquième de pixel représente 0,02 mm ?

# Exercices

- Cadence de production maximale
  - Quel est, en millisecondes (ms), le temps  $t$  disponible pour acquérir et traiter les images de produits défilant sur une ligne de production à la vitesse  $V=1$  m/s et séparés d'une distance  $d=5$  cm avec une caméra matricielle au format SVGA (800×600 pixels) ?
  - Quelle est, en mètre par seconde, la vitesse  $V$  de défilement maximum d'un objet observé par une caméra matricielle de résolution 1600×1200 selon un champ de vision de longueur  $L$  dans le sens du défilement et de hauteur  $H=100$  mm si le temps nécessaire à son acquisition et son traitement est  $t=10$  ms et sachant que la longueur du capteur observe la longueur  $L$  du champ de vision dans le sens du défilement ?



# Exercices

- Quel est, en millisecondes (ms), le temps  $t$  disponible pour acquérir et traiter les images de produits défilant sur un convoyeur de largeur  $l=15$  cm à la vitesse  $V=2$  m/s avec une caméra matricielle au format SVGA (800×600 pixels) si on souhaite visualiser toute la largeur du convoyeur sur la longueur du capteur et si on suppose que les produits sont séparés d'une distance égale à la dimension du champ de vision dans le sens du défilement ?

# Vision industrielle

## Dispositif de capture d'image

### Caméras linéaires

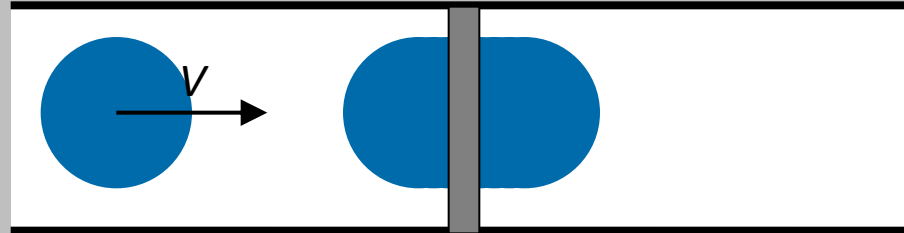
# Choix d'une caméra linéaire

- Résolution
- Fréquence ligne
- Utilisation d'un codeur incrémental
- Déclenchement des acquisitions
- Vitesse maximale de défilement
- Cas des objets en rotation

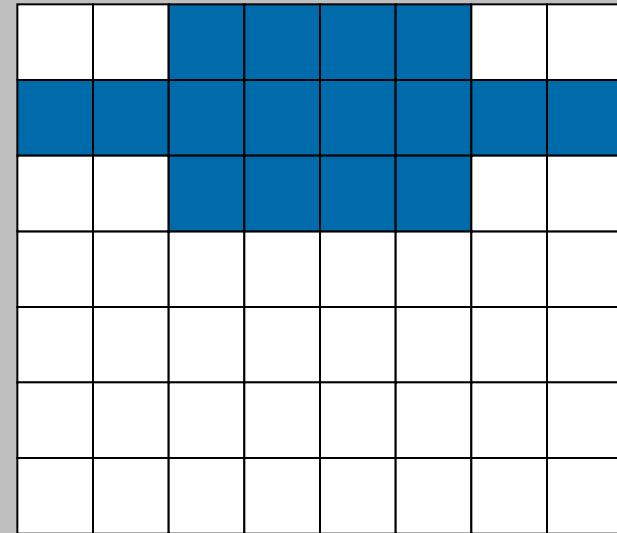
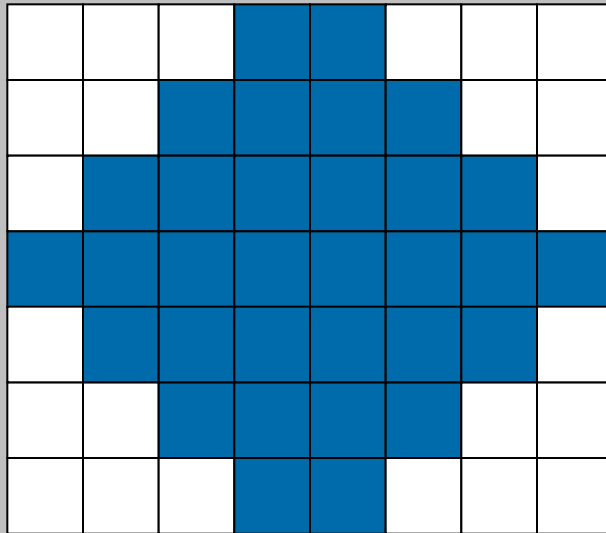
# Définitions

- Deux résolutions sont à déterminer :
  - la résolution **transversale** qui correspond au calcul précédent et qui détermine le nombre de pixels nécessaires pour obtenir une précision souhaitée  $P_T$  dans le sens du capteur,
  - la résolution **longitudinale** qui est déterminée par la précision  $P_L$  que l'on souhaite obtenir dans le sens du défilement à la vitesse  $V$  du produit à inspecter avec un facteur de sécurité  $S$ . La résolution longitudinale correspond à une fréquence  $F$  (nombre d'acquisitions par seconde) et répond à la question : tous les combien de secondes faut-il faire une acquisition pour obtenir la précision souhaitée ?

# Principe d'acquisition

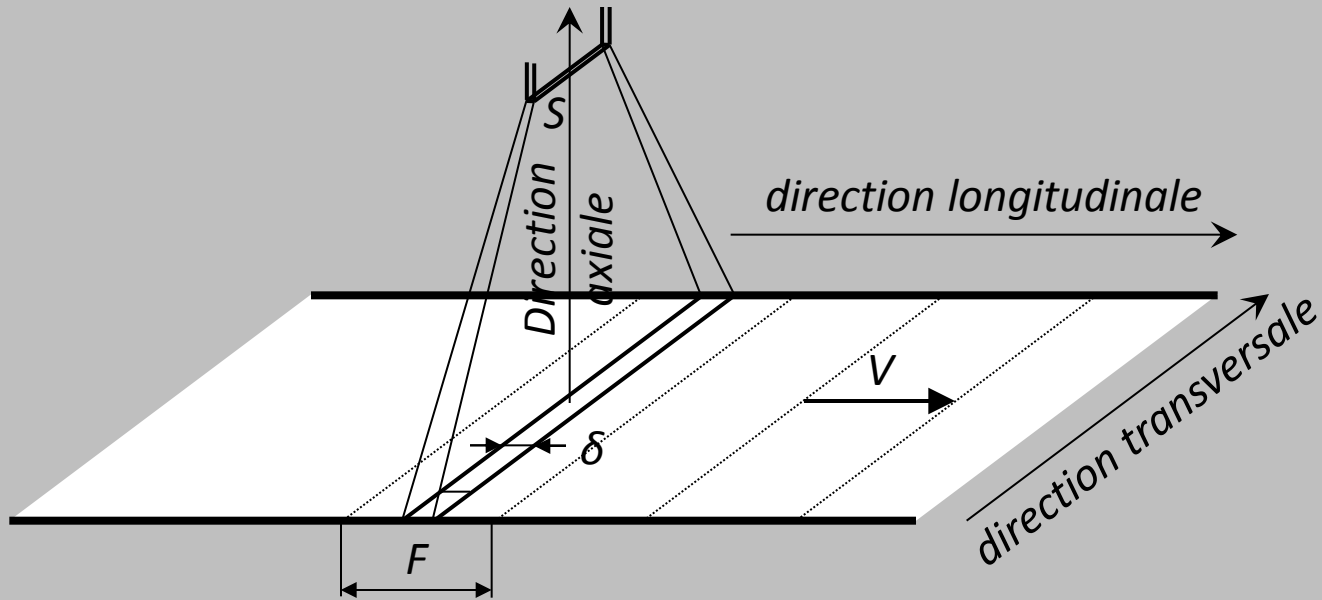


$F$



*Augmentation de  $V$  ou diminution de  $F$*

# Calcul de la fréquence ligne



$$\delta \text{ (mm)} \rightarrow S \text{ (lignes)}$$

$$V \text{ (mm)} \rightarrow 1 \text{ (sec)} \rightarrow F \text{ (lignes)}$$

$$\Rightarrow R = \frac{H}{P_T}$$

$$\Rightarrow F = \frac{S \times V}{\delta} = \frac{V}{P_L}$$

# Calcul de la fréquence ligne

- Application numérique :

- $\delta = 1 \text{ mm}$
- $S = 3$
- $V = 10 \text{ m/mn}$

- Remarque :

- On utilise parfois la **fréquence pixel** plutôt que la **fréquence ligne**. Par exemple, une caméra linéaire de 2048 pixels et de fréquence pixel égale à 5 MHz possède une fréquence ligne d'environ 2400 Hz :

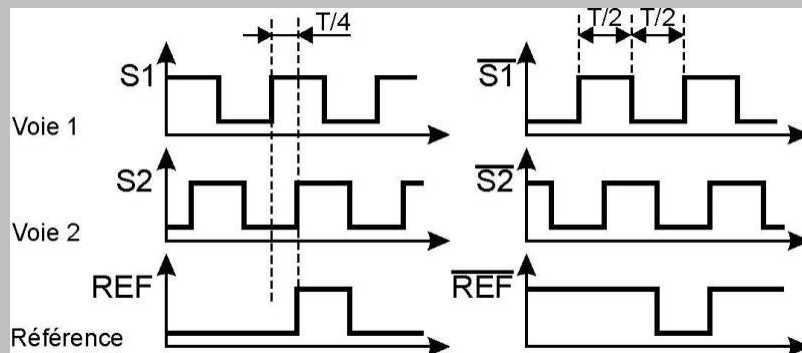
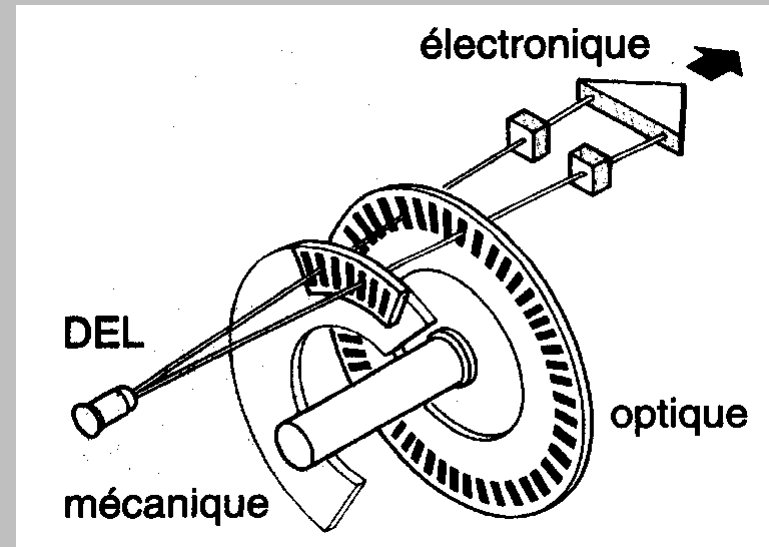
$$\frac{1}{\frac{1}{5000000} \times 2048} = 2441,40625$$

# Utilisation d'un codeur incrémental

- Problématique
  - La taille du plus petit élément  $\delta$  dans le sens du défilement dépend de la vitesse. Si la vitesse varie au cours du défilement, la précision varie également.
  - Afin de disposer d'une précision indépendante de la vitesse, on utilise un **codeur incrémental** qui déclenche l'acquisition des images-lignes. Ce codeur, couplé à l'arbre moteur entraînant le convoyeur, envoie  $N$  impulsions à la caméra pour un déplacement de  $\Delta d$  mm du convoyeur.
  - Quelle que soit la vitesse, le même nombre d'images-lignes est acquis par tour de codeur effectué.



# Calcul de la résolution du codeur



$$\delta \text{ (mm)} \rightarrow S \text{ (lignes)}$$

$$\Delta d \text{ (mm)} \rightarrow N \text{ (lignes)}$$

$$\Rightarrow N = \frac{S \times \Delta d}{\delta} = \frac{\Delta d}{P_L}$$

# Déclenchement des acquisitions sans codeur

- Signal de déclenchement d'acquisition des images-lignes sans codeur
  - La caméra génère son propre signal de déclenchement en mode « free running ».
  - La carte génère un signal de déclenchement interne de fréquence réglable par l'utilisateur et commande la caméra. Le temps d'exposition est, soit défini par la durée de l'impulsion générée par la carte, soit réglé sur la caméra.

# Déclenchement des acquisitions avec codeur

- Signal de déclenchement d'acquisition des images-lignes avec codeur
  - La carte génère un signal de déclenchement identique au signal du codeur incrémental auquel elle est reliée.
  - La carte génère un signal de déclenchement ré-échantillonné en fonction du signal provenant du codeur incrémental auquel elle est reliée. Ce ré-échantillonnage permet d'opérer à des fréquences d'acquisition différentes que celles délivrées par le codeur incrémental. La caméra peut également travailler en mode free running à sa fréquence maximale.

# Calcul de la vitesse maximale de défilement

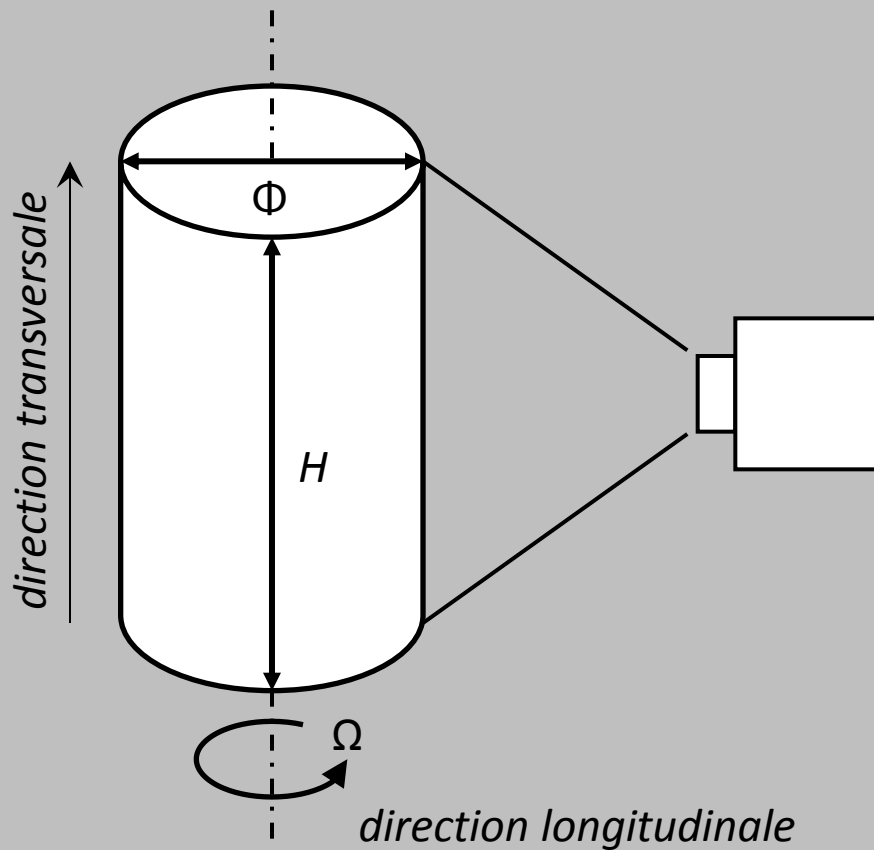
- La caméra possédant une fréquence d'acquisition maximale  $F_{\max}$ , la vitesse de déplacement du produit défilant sous la caméra est limitée à  $V_{\max}$  afin que toutes les images-lignes soient acquises.

$$F_{\max} \text{ (lignes)} \rightarrow 1 \text{ (sec)} \rightarrow V_{\max} \text{ (mm)}$$

$$N \text{ (lignes)} \rightarrow \Delta d \text{ (mm)}$$

$$\Rightarrow V_{\max} = \frac{F_{\max} \times \Delta d}{N}$$

# Cas d'un objet en rotation



$$\Omega \text{ (tour)} \rightarrow 1 \text{ (mn)}$$

$$\pi \times \Phi \text{ (mm)} \rightarrow 60 \text{ (sec)}$$

$$V \text{ (mm)} \rightarrow 1 \text{ (sec)}$$

$$\Rightarrow V = \frac{\Omega \times \pi \times \Phi}{60}$$

$$\Rightarrow F = \frac{S \times \Omega \times \pi \times \Phi}{60 \times \delta} = \frac{\Omega \times \pi \times \Phi}{60 \times P_L}$$

Avec un codeur ( $\Delta d = \pi \times \Phi$ ) :

$$\Rightarrow N = \frac{S \times \pi \times \Phi}{\delta} = \frac{\pi \times \Phi}{P_L}$$

$$\Rightarrow V_{\max} = \frac{F_{\max} \times \pi \times \Phi}{N}$$

# Exercices

- Résolution et fréquence ligne
  - Quelle doit être la résolution  $R$  et la fréquence ligne  $F$  d'une caméra linéaire pour inspecter un produit en défilement continu de largeur  $L=1$  m à la vitesse  $V=1$  m/s avec une précision de  $P=0,5$  mm/pixel ?

# Exercices

- On désire faire l'acquisition d'un objet de largeur  $L=1,2$  m en défilement continu à une vitesse  $V=30$  m/mn à l'aide d'une caméra linéaire placée à une distance  $D=1$  m de cet objet. On utilise pour cela une caméra I2S de modèle IDC181BC8 qui est constituée de 5000 pixels de taille  $7\times 7$   $\mu\text{m}$ . Cette caméra possède une fréquence ligne maximum de 1000 lignes/s.
  - ◆ En supposant que la ligne de visée contient tout l'objet à contrôler, quelles sont, en millimètres par pixel, les précisions transversale et longitudinale de ce système de vision ?
  - ◆ Est-il possible de détecter un défaut de  $1\times 1$  mm ?

# Exercices

- Est-il possible de contrôler un produit de largeur  $L=1$  m défilant en continu sur un convoyeur à la vitesse  $V=3$  m/s en utilisant une caméra linéaire de fréquence ligne maximale  $F_{max}=12$  kHz et de résolution  $R=6144$  pixels avec une précision transversale et longitudinale théorique égale à  $P=0,2$  mm/pixel ? Pourquoi ?
- Quelle doit être la fréquence d'acquisition  $F$  d'une caméra linéaire de résolution  $R=8192$  pixels observant un produit de largeur  $L=2$  m défilant en continu sur un convoyeur à la vitesse  $V=60$  m/min pour que la précision longitudinale (sens du défilement) soit égale à la précision transversale (sens du capteur) ?



# Exercices

- Utilisation d'un codeur incrémental
  - Un codeur incrémental, qui est couplé à un arbre moteur entraînant un convoyeur, génère  $N$  impulsions pour un déplacement de  $\Delta d=1$  m du convoyeur.
    - ◆ Quelle doit être la résolution  $N$  de ce codeur pour observer un produit de largeur  $L=2$  m défilant en continu sur ce convoyeur avec une caméra linéaire de fréquence d'acquisition  $F=9$  kHz et de résolution  $R=8192$  pixels afin que la précision longitudinale (sens du défilement) soit égale à la précision transversale (sens du capteur) ?
    - ◆ En déduire  $V_{max}$ , la vitesse linéaire maximale de défilement.

# Exercices

- On souhaite inspecter la surface d'un produit de forme cylindrique de diamètre  $\Phi=15$  cm et de hauteur  $H=40$  cm avec une caméra linéaire de fréquence ligne maximale  $F=18$  kHz et de résolution  $R=4096$  pixels en utilisant un codeur incrémental générant  $N=8192$  impulsions par tour pour déclencher l'acquisition des images-lignes. Quelle est, en mètre par seconde (m/s), la vitesse linéaire maximale  $V_{max}$  à laquelle ce produit peut être mis en rotation autour de son axe d'inertie pour acquérir toutes les images-lignes demandées par le codeur couplé au moteur ?

# Exercices

- Inspection d'objets cylindriques
  - Quelles doivent être la résolution  $R$  et la fréquence ligne  $F$  d'une caméra linéaire pour inspecter un produit cylindrique de hauteur  $H=30$  cm et de diamètre  $D=5$  cm qui tourne à la vitesse  $\Omega=200$  tours/mn autour de son axe avec une précision de  $P=0,1$  mm/pixel et en prenant un facteur de sécurité  $S=3$  ?
  - Est-il possible d'inspecter un objet cylindrique de diamètre  $\Phi=30$  cm en rotation à la vitesse  $\Omega=90$  tours/mn avec une caméra linéaire de fréquence ligne maximale  $F_{max}=10$  kHz sachant que l'arbre moteur entraînant cet objet est couplé à un codeur incrémental déclenchant  $N=10\ 000$  acquisitions par tour ? Pourquoi ?

# Exercices

- Calculer la fréquence ligne  $F$  et la résolution  $R$  que doit posséder au minimum une caméra linéaire pour contrôler un objet cylindrique de hauteur  $H=20$  cm et de diamètre  $\Phi=8$  cm mis en rotation à la vitesse maximale  $\Omega=60$  tours/min de telle sorte à obtenir une précision transversale égale à la précision longitudinale lorsque cette caméra doit acquérir toutes les images-lignes commandées par un codeur incrémental délivrant  $N=10\,000$  impulsions par tour.

# Exercices

- Mémoire image
  - Quel est, en kilo-octets, l'espace mémoire occupé par une image monochrome codée sur 10 bits acquise par une caméra linéaire possédant 12288 pixels et faisant l'acquisition d'un objet sur 4000 lignes ?
  - Quel est le nombre maximal de lignes que peut mémoriser une carte d'acquisition reliée à une caméra linéaire monochrome de résolution  $R=4096$  pixels sachant que la capacité mémoire de cette carte lui permet de stocker une image de 32 Mo et que l'image est codée sur 8 bits ?

# Exercices

- Quel est le nombre maximal de lignes que peut stocker une carte d'acquisition reliée à une caméra linéaire couleur de résolution  $R=6144$  pixels sachant que la capacité mémoire de cette carte lui permet de stocker une image de 128 Mo et que les valeurs de l'image sont codées sur un octet. La réponse sera donnée sous la forme d'un nombre entier.
- Est-il possible de stocker dans une carte d'acquisition de capacité mémoire 128 Mo, une image codée sur 10 bits et acquise par une caméra linéaire possédant 12288 pixels faisant l'acquisition d'un objet sur 8000 lignes ? Justifier la réponse par le calcul pour une image monochrome puis pour une image couleur acquise par une caméra tri-linéaire.

# Vision industrielle

## Dispositif de capture d'image

### Le dispositif optique

# Plan du cours

- L'objectif
- La focale
- L'ouverture
- La mise au point
- Qualité d'image
- Choix de l'objectif



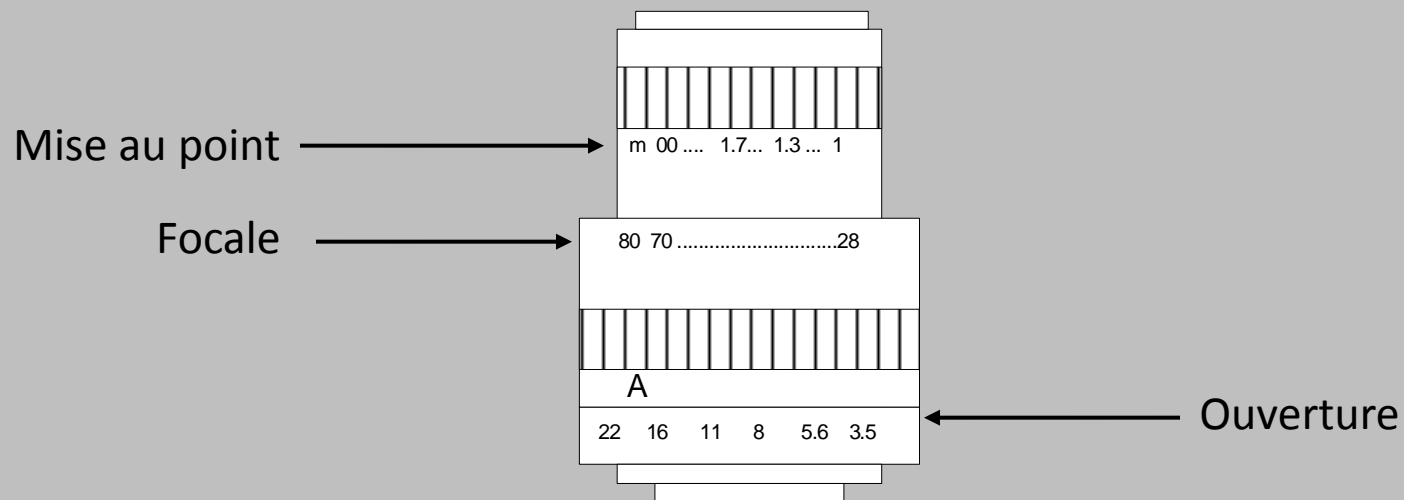
# Constitution

- Ensemble de lentilles permettant de projeter une scène réelle sur un même plan (capteur) en faisant converger (ou diverger) les rayons lumineux



*Objectifs*

# Éléments de réglage



# Éléments de réglage

- La focale
  - Elle permet de voir les objets plus ou moins grands.
  - Elle peut être fixe ou variable (**zoom** ou vari-focale).
  - Les objectifs à **focale variable** sont très peu utilisés en vision industrielle.
- L'ouverture
  - En jouant sur le diaphragme (ou iris), la quantité de lumière atteignant le capteur est plus ou moins grande.
  - Elle peut être réglée manuellement ou automatiquement.
  - Le diaphragme peut avoir différentes formes (circulaire, triangle, polygone).

# Éléments de réglage

- La mise au point (focus)
  - Elle permet d'obtenir une image nette en déplaçant les lentilles.
  - Son réglage dépend de la distance de l'objet, de la focale et de l'ouverture.
  - Il existe une zone où l'image des éléments se situant devant et derrière l'objet visé apparaît comme nette. Cette zone définit la **profondeur de champ**. C'est la distance qui sépare le premier plan net (PPN) du dernier plan net (DPN) d'un objet situé à une certaine distance de l'objectif.
  - La mise au point peut être effectuée manuellement ou automatiquement (**autofocus**).

# Monture

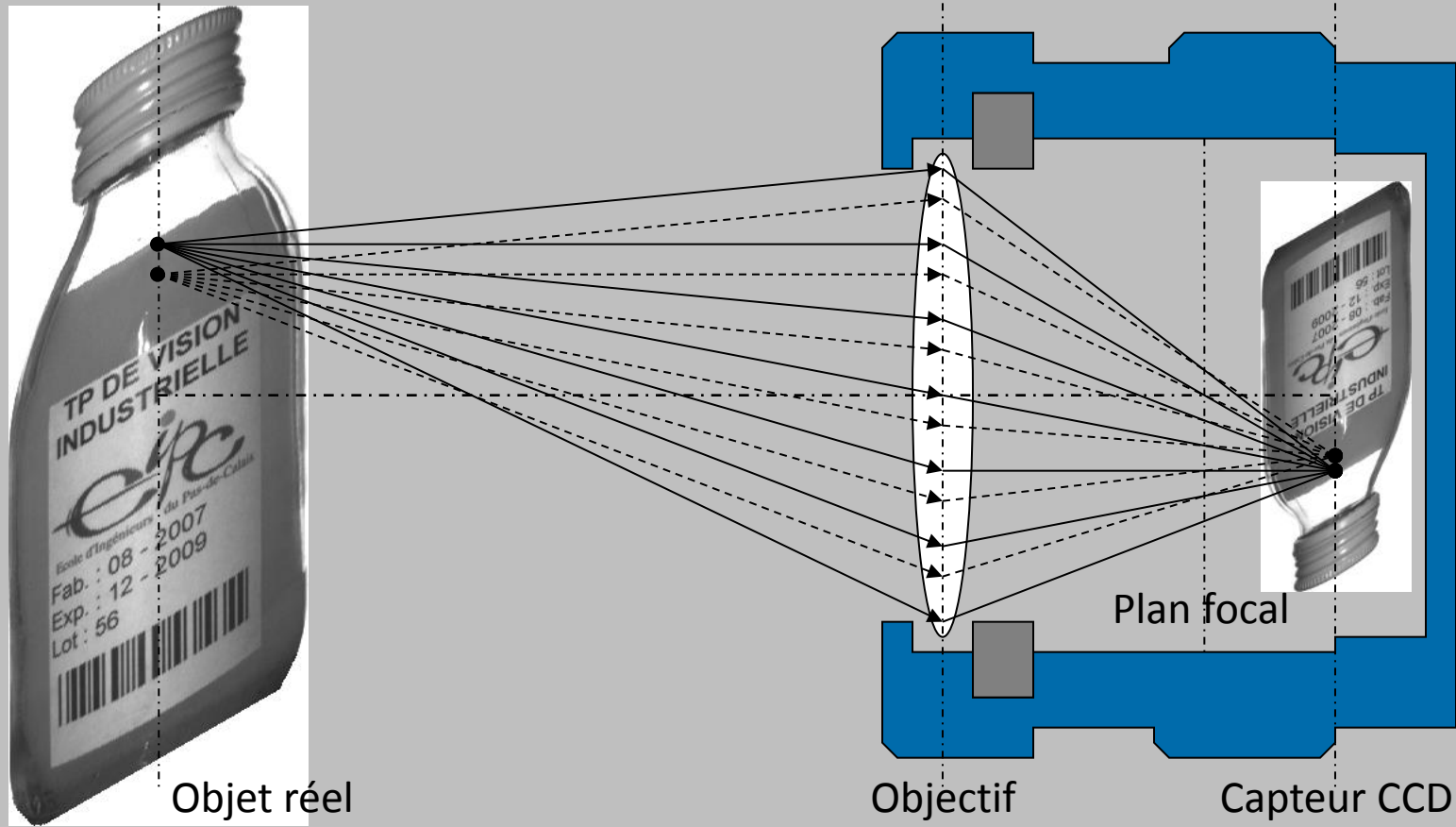
- Définition
  - Partie de l'objectif permettant sa fixation sur une caméra.
  - Elle peut être à visser (monture C ou CS) ou à baïonnette (monture F ou K).
  - Son diamètre est variable et dépend des dimensions du capteur.

# Monture

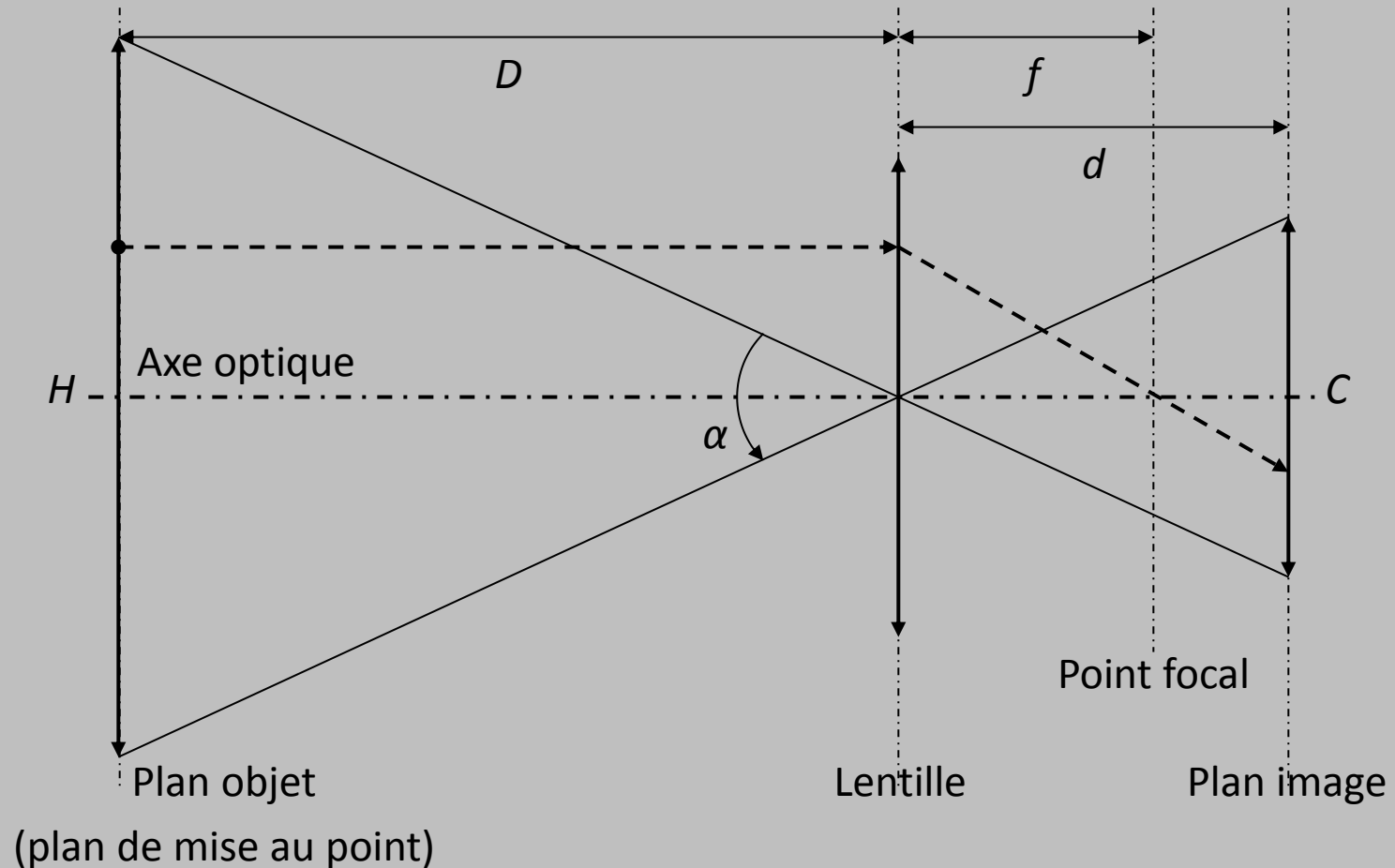
Dénomination	Fixation	Diamètre	Tirage
C	vis	25 mm	17,526 mm
CS	vis	25 mm	12,526 mm
F	baïonnette	48 mm	46 mm
M42	vis	42 mm	12 mm
M72	vis	72 mm	12 mm
miniatures	vis	10 - 17 mm	faible

*Les différentes montures (ou fixation)*

# Modèle de la lentille mince



# Distance focale



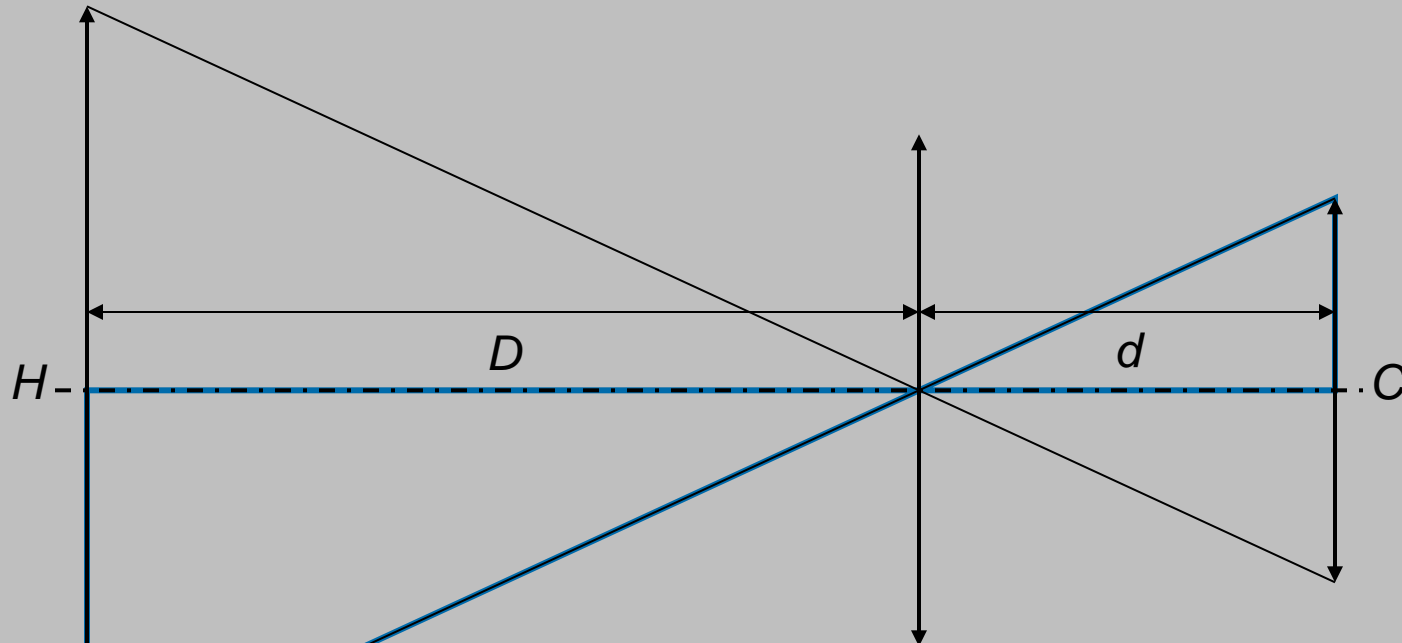


# Loi de Descartes

- Notations
  - $D$ , la distance entre l'objet et l'objectif (**distance de travail**)
  - $d$ , la distance entre l'objectif et le capteur
  - $f$ , la **distance focale** (distance entre l'objectif et le point focal)
  - $H$ , la taille du champ visualisé (champ de vision)
  - $C$ , la taille du capteur (longueur ou largeur)
  - $\alpha$ , l'angle de vue ou angle de champ
- Relation de Descartes :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{D} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{D \times d}{D + d}$$

# Théorème de Thalès



$$\frac{C/2}{H/2} = \frac{d}{D} \quad \Rightarrow \quad d = \frac{C \times D}{H}$$

# Grandissement

- Définition
  - Le grandissement  $m$  (**magnification**) est le rapport entre la taille du champ de vision et celle du capteur dans une direction donnée.
  - D'après le théorème de Thalès :

$$m = \frac{C/2}{H/2} = \frac{C}{H} = \frac{d}{D}$$

$$\Rightarrow f = \frac{D \times d}{D + d} = \frac{D \times d}{\left(1 + \frac{d}{D}\right) \times D} = \frac{d}{1 + m}$$

# Calcul simplifié

- Hypothèse

- On suppose l'objet suffisamment éloigné du capteur ( $d \ll D$ ) de sorte que :

$$D + d \approx D \quad \Rightarrow f \approx \frac{D \times d}{D} \approx d$$

- Ce qui conduit à la relation :

$$f \approx \frac{C \times D}{H}$$

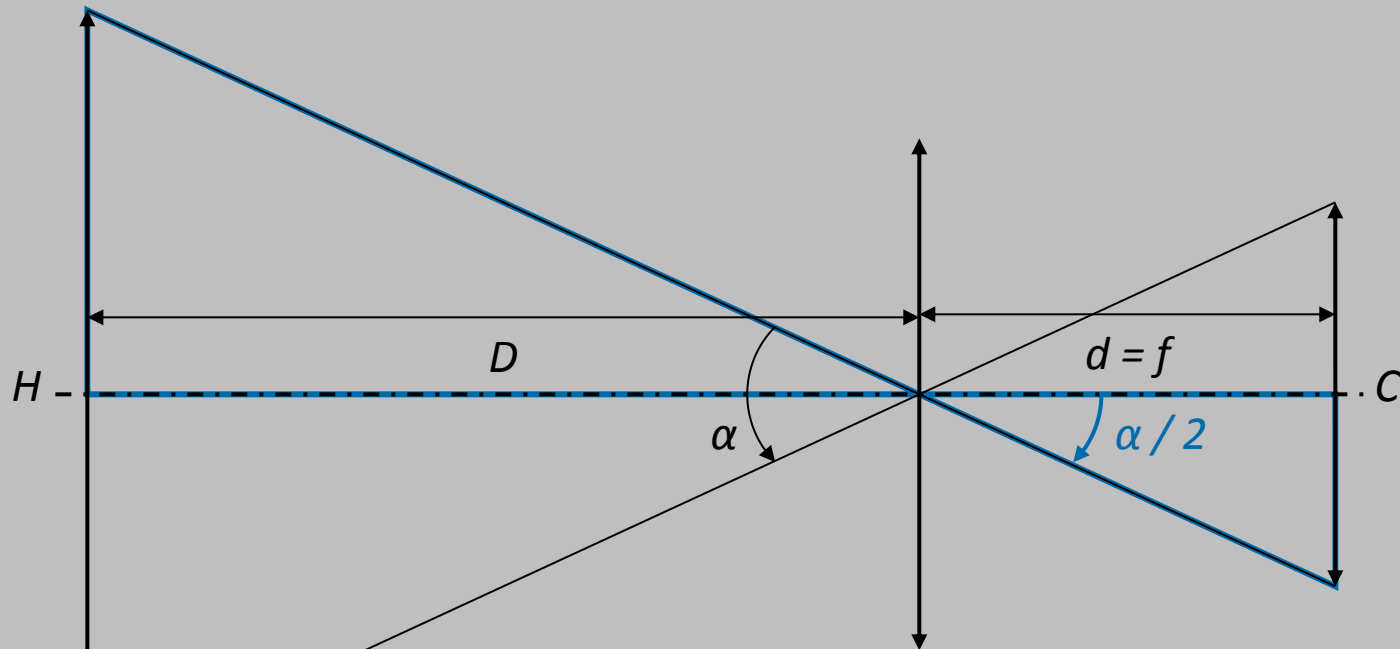
# Choix de la focale

- Remarques
  - La focale dépend essentiellement de la taille de l'objet, de la distance de travail et de la taille du capteur.
  - La focale étant proportionnelle à la distance de travail, plus on approche (ou on éloigne) l'objet, plus il faut diminuer (ou augmenter) la focale.
  - La focale étant inversement proportionnelle à la taille de l'objet, plus la taille augmente (ou diminue), plus il faut diminuer (ou augmenter) la focale.

# Choix de la focale

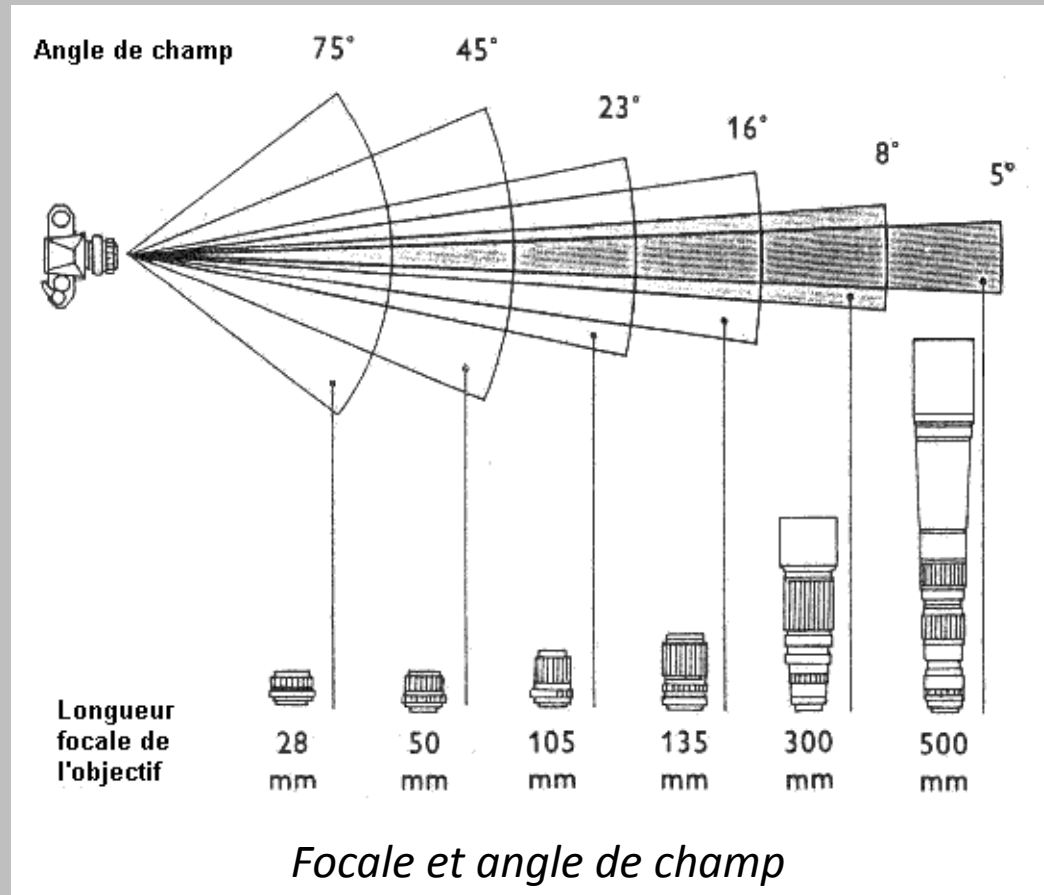
- Critères
  - Les focales les plus courantes sont, en mm : 4, 6, 8, 9, 12, 16, 25, 35, 50 et 75.
  - Selon sa qualité et sa focale, un objectif déforme plus ou moins (**distorsion**) les images de la scène.
  - Plus la focale est importante, plus l'angle de champ est faible.

# Angle de champ



$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{C/2}{d} \quad \Rightarrow \alpha = 2 \arctan\left(\frac{C}{2f}\right)$$

# Exemple





# Type d'objectif

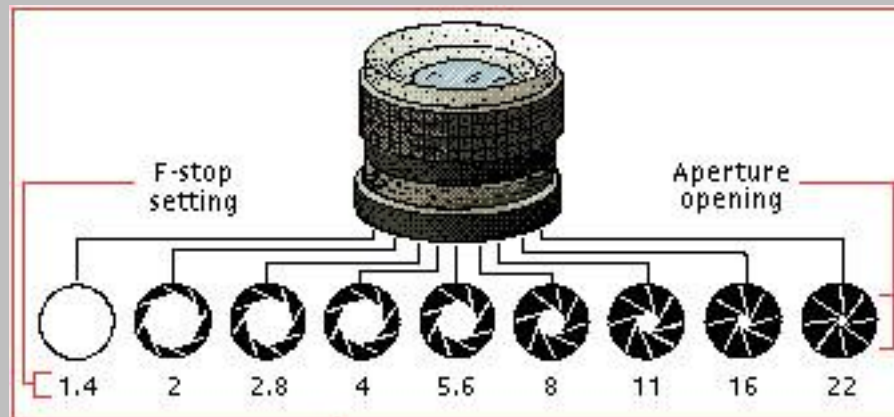
- Les objectifs **grand angle** ou **grand angulaire**
  - Ils possèdent une faible focale (inférieure à 12 mm).
  - Ils sont utilisés pour des objets de grandes tailles ou pour des objets situés proches de la caméra.
- Les **téléobjectifs** ou les **longues focales**
  - Ils possèdent une grande focale (supérieure à 75 mm).
  - Ils sont utilisés pour des objets éloignés ou de petites tailles.

# Le nombre d'ouverture

- Définition
  - Le nombre d'ouverture, noté  $NO$  (ou F-number) correspond à la quantité de lumière pouvant passer dans l'objectif. Il se calcule en divisant la focale  $f$  de l'objectif par le diamètre  $\Phi$  du diaphragme  $NO = f / \Phi$ .
  - Le nombre d'ouverture étant inversement proportionnel au diamètre du diaphragme, plus le diaphragme est ouvert (grand diamètre), plus la quantité de lumière est grande (image lumineuse) et plus le nombre d'ouverture est petit. Les objectifs possédant des nombres d'ouvertures faibles sont donc plus volumineux et plus chers.

# Le nombre d'ouverture

- Valeurs standards du nombre d'ouverture
  - Les valeurs du nombre d'ouverture les plus utilisées sont : 1, 1.4, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22 et se notent  $f/1$ ,  $f/1.4$ , ...,  $f/22$ .
  - Chaque incrément de  $NO$  correspond à une réduction de la moitié de la lumière passant dans l'objectif.

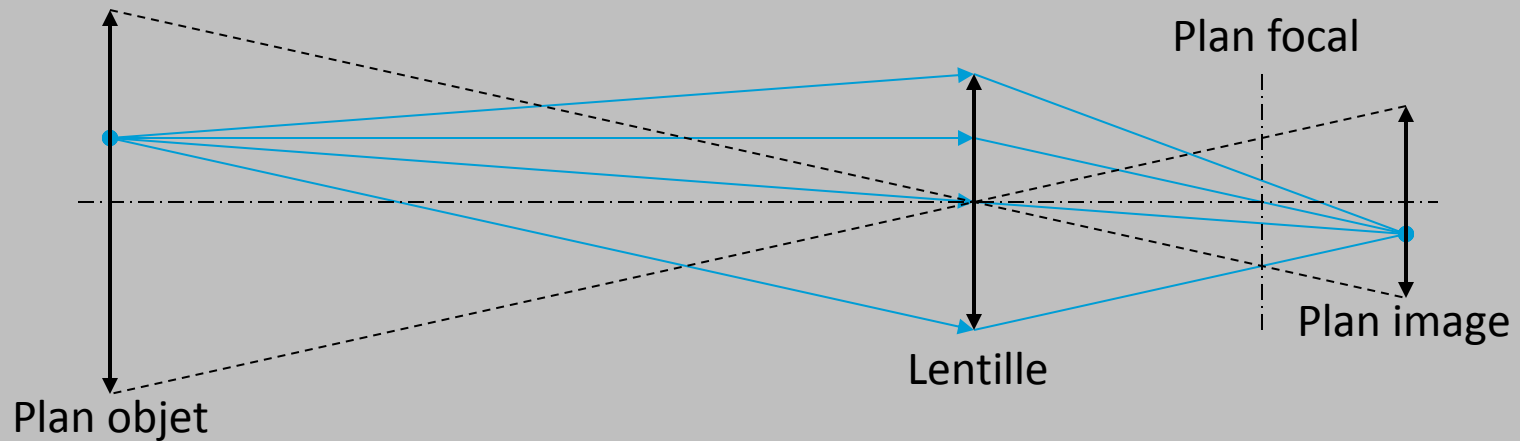


*Le nombre d'ouverture est un multiple de  $\sqrt{2}$*

# Principe

- Image nette
  - La mise au point consiste à déterminer le réglage permettant d'obtenir une image nette en actionnant une bague.
  - Ainsi, il existe une plage de réglage plus ou moins large où l'image apparaît nette.
  - L'image reste nette tant qu'un point de la scène se projette sur un même élément du capteur.

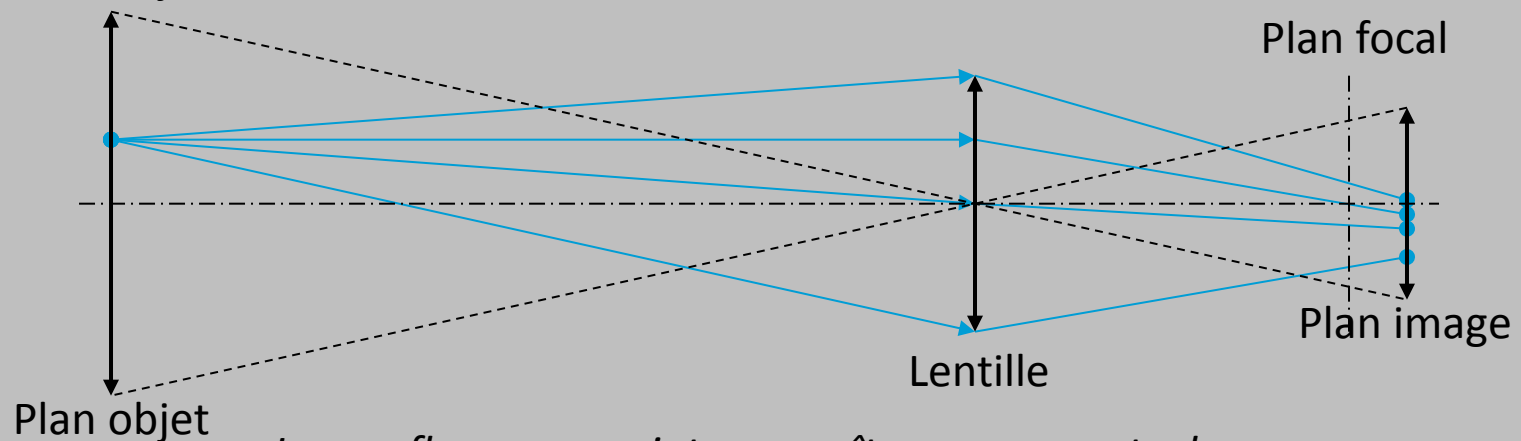
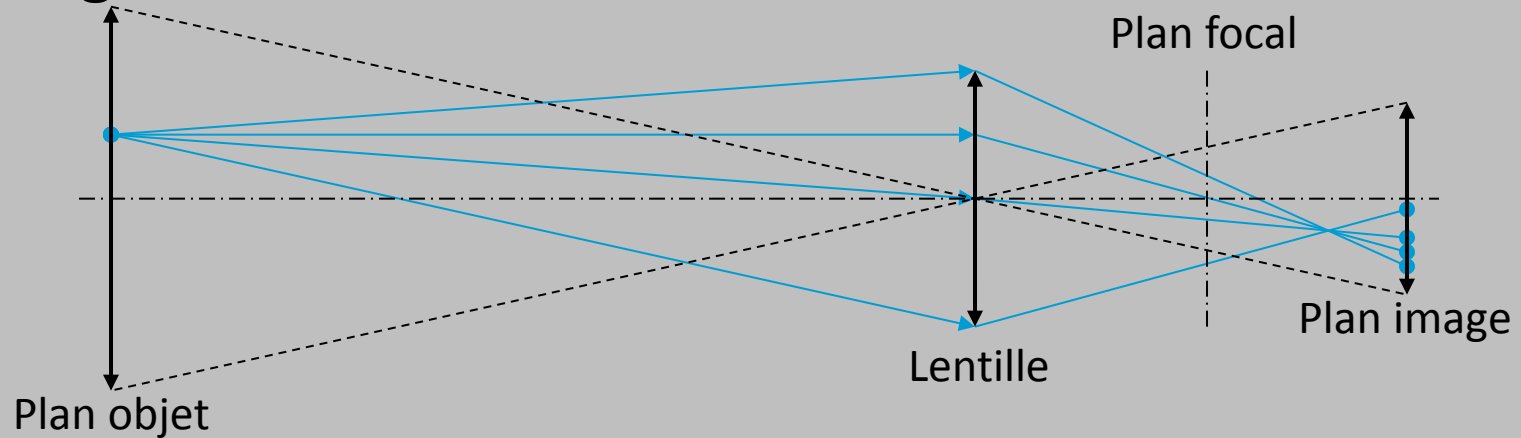
# Principe



*Image nette : un point apparaît comme un point*

# Principe

- Image floue

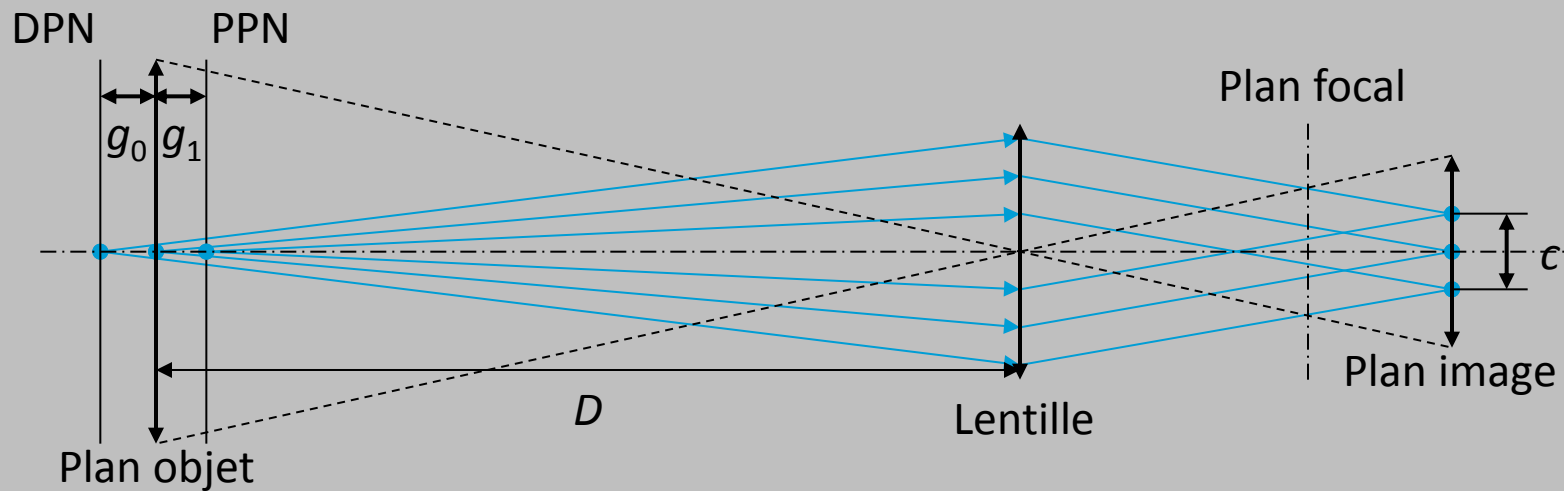


*Image floue : un point apparaît comme une tache*

# Profondeur de champ

- Définition
  - La **profondeur de champ** est la distance qui sépare le premier plan net (PPN) du dernier plan net (DPN) d'un objet situé à une certaine distance de l'objectif.
  - C'est donc une zone de réglage où l'image reste toujours nette. Pour un objet visé, elle détermine la zone de netteté devant et derrière cet objet.
  - Il est admis que l'image du PPN et du DPN est nette si un point de ces plans se projette sur un même photosite de côté  $c$  du capteur.

# Profondeur de champ



$$pdc = g_0 + g_1 = \frac{2NOcf^2D(D-f)}{f^4 - NO^2c^2(D-f)^2}$$



# Profondeur de champ

- La profondeur de champ  $pd_c$  dépend de :
  - l'ouverture du diaphragme ( $NO$ ) : plus le diaphragme est ouvert, plus la profondeur de champ est faible,
  - la distance focale de l'objectif ( $f$ ) : plus la focale est longue, plus la profondeur de champ est faible,
  - la distance de travail ( $D$ ) : plus l'objet est proche, plus la profondeur de champ est faible,
  - la taille des pixels du capteur associé ( $c$ ) : plus les pixels sont petits, plus la profondeur de champ est faible.

# Distance minimale d'objet

- Définition

- La distance minimale d'objet (MOD) ou hyperfocale est la distance la plus courte à laquelle on peut placer l'objet pour que l'objectif, réglé sur l'infini, puisse donner une image nette.
- La MOD dépend également de la focale, de l'ouverture et de la taille des pixels du capteur utilisé.

# Distance minimale d'objet

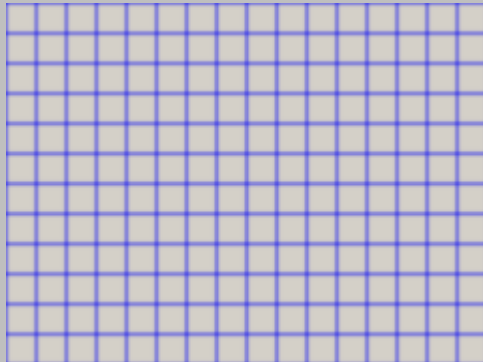
- Bagues allonges
  - Placée entre la monture de la caméra et la base de l'optique, les bagues allonges permettent d'effectuer une mise au point sur un objet situé à une distance inférieure à MOD en augmentant le tirage optique (ou tirage mécanique).
  - Elles conviennent donc pour des objets de petites dimensions ou proches de la caméra mais elles diminuent aussi :
    - ◆ la sensibilité de la caméra,
    - ◆ la profondeur de champ,
    - ◆ la luminosité de l'image.

# Défauts et aberrations

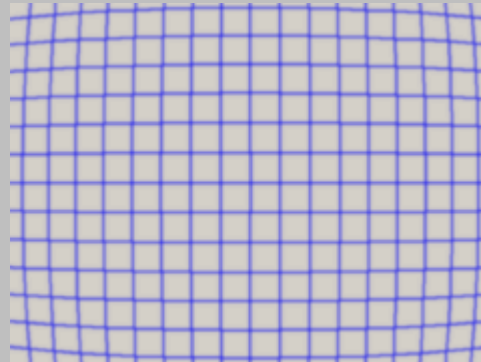
- Aberration géométrique (**distorsion**)
  - C'est la déformation géométrique de la représentation d'un objet dans le plan image.
  - En général, l'image se dégrade au fur et à mesure que l'on s'éloigne de son centre car les phénomènes de perspective et de diffraction sont accentués avec l'angle d'incidence sur les bords des lentilles qui ne possèdent pas les mêmes caractéristiques qu'en leur centre (épaisseur, courbure, ...).

# Défauts et aberrations

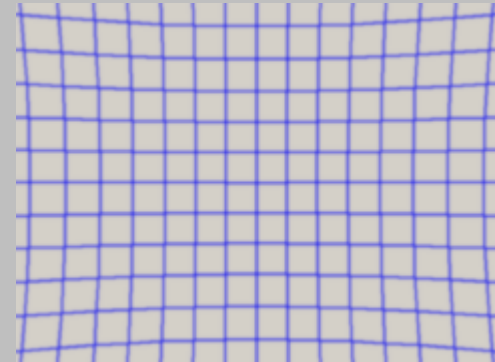
- La distorsion dépend de :
  - ◆ la focale de l'objectif : plus la focale est courte (grand angulaire), plus la distorsion en barillet est importante et plus elle est longue (téléobjectif), plus la distorsion en coussinet est importante,
  - ◆ la mise au point,
  - ◆ l'emplacement du diaphragme.



*Pas de distorsion*



*Distorsion en barillet  
(objectif grand angle)*



*Distorsion en coussinet  
(objectif longue focale)*

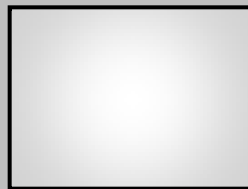
# Défauts et aberrations

- La distorsion pose de sérieux problèmes en vision industrielle pour des applications de mesure et il est nécessaire de la corriger :
  - ◆ Par connaissance des caractéristiques de distorsion de l'objectif et en appliquant un modèle inverse,
  - ◆ En utilisant une mire permettant d'évaluer la distorsion pour quelques points caractéristiques et en extrapolant pour les autres.

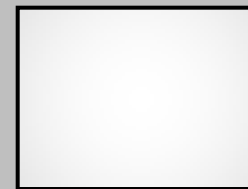
# Défauts et aberrations

- Vignettage

- La quantité de lumière reçue par le capteur peut varier entre le centre du capteur et ses bords. Ce phénomène, dû principalement à l'arrêt des rayons lumineux par les parties mécaniques de l'objectif et accentué par la loi cosinus puissance 4, s'appelle le **vignettage**.



*Objectif de dimension  
égale au capteur :  
vignettage*



*Objectif de dimension  
supérieure au capteur :  
baisse du contraste*

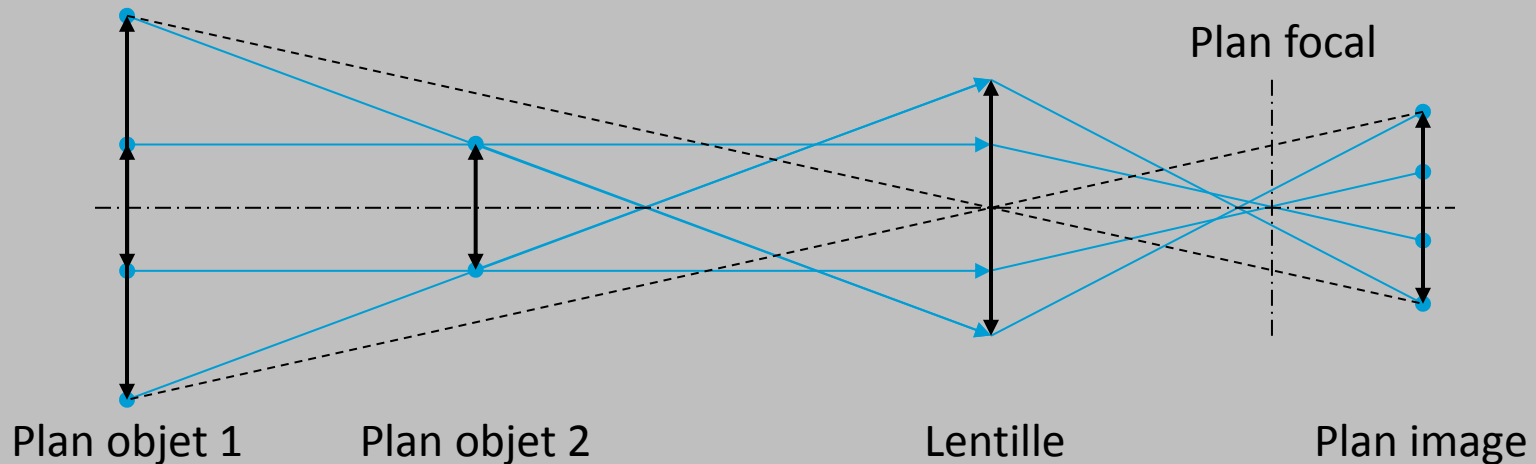
# Défauts et aberrations

- Changement d'échelle et effet de perspective
  - Lorsqu'ils ne sont pas situés à la même distance de travail, deux objets de taille différente peuvent apparaître de même taille dans l'image tandis que deux objets de même taille peuvent apparaître de taille différente.
  - L'effet de perspective est d'autant plus prononcé que l'angle de champ est grand.
  - Il apparait notamment lors de l'observation d'objets en 3 dimensions et pose donc des problèmes dans le contrôle dimensionnel ou d'alignement.
  - Cet effet peut être corrigé par calcul ou en utilisant des **objectifs télécentriques**.



# Défauts et aberrations

- Changement d'échelle



*Les rayons lumineux réfléchis avec le même angle d'incidence par deux objets de taille différente et situés à des distances de travail différentes se projettent sur le même point du plan image et ces objets apparaissent de même taille dans l'image.*

*Avec un objectif télécentrique qui ne considère que les rayons parallèles à l'axe optique, deux objets de même taille et situés à des distances de travail différentes apparaissent bien de même taille dans l'image.*

# Défauts et aberrations

- Aberration chromatique
  - En fonction de leur longueur d'onde, les rayons lumineux ne sont pas transmis ou absorbés de la même façon par les matériaux optiques. L'intensité et la direction de ces rayons varient avec leur longueur d'onde.
  - Ainsi chaque objectif est caractérisé par sa **transmission spectrale**.

# Défauts et aberrations

- Une réfraction et une intensité différentes des rayons lumineux vers le capteur engendrent une mauvaise focalisation en fonction de la longueur d'onde et affectent l'équilibre des couleurs. Ce phénomène s'appelle l'aberration chromatique et peut atteindre plusieurs pixels.
- Il faut alors utiliser des objectifs chromatiquement corrigés ou des lumières monochromatiques plutôt que des lumières blanches.

# Quelques fabricants d'objectifs

- Pentax
- Nikon
- Schneider
- Sigma
- Tamron
- Fujinon

The logo for Pentax, featuring the word "PENTAX" in a bold, red, sans-serif font.The Tamron logo, featuring the word "TAMRON" in a bold, blue, sans-serif font.

# Exemple

- Questions
  - A quelle distance  $D$  doit on placer un objet de hauteur  $H = 1$  m pour le visualiser sur toute la longueur  $C$  d'un capteur de taille un demi pouce en utilisant un objectif de focale  $f = 12$  mm ?
  - Quelle est la précision théorique  $P$  obtenue si le capteur a une résolution  $R_x \times R_y$  de  $640 \times 480$  ?

# Exercices

- Caméra matricielle
  - On désire faire l'acquisition d'un objet statique de hauteur  $H=250$  mm en utilisant une caméra matricielle à capteur CCD de taille un demi-pouce placée à une distance  $D=50$  cm de cet objet.
    - ◆ Quelle est, en millimètres, la focale de l'objectif à utiliser pour que la hauteur de l'objet soit totalement vu dans l'image (attention, le sens du capteur n'est pas précisé) ?
    - ◆ Quelle est la hauteur  $H'$  du champ de vision si on utilise un objectif de focale  $f=12$  mm (dans les deux cas) ?
    - ◆ Quelle orientation du capteur faut-il choisir afin de visualiser au moins la hauteur  $H=250$  mm ?
    - ◆ A quelle distance  $D'$  doit-on placer la caméra pour visualiser la hauteur  $H=250$  mm dans ce cas ?

# Exercices

- Quelle focale faut-il choisir pour qu'un objet de hauteur  $H=50$  cm et de largeur  $L=50$  cm soit entièrement vu sur un capteur de taille un demi pouce (*largeur*=4,8 mm et *longueur*=6,4 mm) placé à une distance  $D=1$  m ?
- Quelle est la largeur  $l$  du champ de vision observée par un capteur matriciel de taille deux tiers de pouce (*largeur*=6,6 mm et *longueur*=8,8 mm) si on suppose que la longueur du capteur observe un champ de vision de longueur  $L=40$  cm et que la distance de travail est  $D=1$  m ?

# Exercices

- Est-il possible d'observer la totalité d'une feuille de papier au format A4 (21×29,7 cm) en utilisant une caméra matricielle équipée d'un capteur de taille deux tiers de pouce (*largeur*=6,6 mm et *longueur*=8,8 mm) et d'un objectif de focale  $f=25$  mm sachant que la distance de travail est  $D=1$  m ? Pourquoi ?
- Calculer, en millimètres par pixel (mm/pixel), la précision  $P$  d'un système de vision composé d'une caméra matricielle de résolution 640×480 munie d'un capteur de taille un demi pouce (*largeur*=4,8 mm, *longueur*=6,4 mm) et équipée d'un objectif de focale  $f=25$  mm avec une distance de travail  $D=1$  m.



# Exercices

- Calculer, en millimètre, la focale de l'objectif qu'il faut monter sur une caméra possédant des éléments photosensibles de côté  $c=7 \mu\text{m}$  pour observer, avec une précision  $P=0,1 \text{ mm/pixel}$ , un objet situé à une distance de travail  $D=50 \text{ cm}$ .

# Exercices

- Caméra linéaire
  - Quelle est, en millimètres par pixel (mm/pixel), la précision transversale (sens du capteur) obtenue avec une caméra linéaire possédant des éléments photosensibles de côté  $c=10\ \mu\text{m}$  et équipée d'un objectif de focale  $f=50\ \text{mm}$  placé, sur cette caméra, à une distance  $D=2\ \text{m}$  de la surface à observer ?

# Exercices

- Quelle est, en millimètres, la focale  $f$  de l'objectif à utiliser pour inspecter un produit défilant en continu à la vitesse  $V=45$  m/min si on souhaite obtenir une précision transversale (sens du capteur) égale à la précision longitudinale (sens de défilement) avec une caméra linéaire qui possède des éléments photosensibles de côté  $c=10$   $\mu\text{m}$ , une fréquence ligne maximale  $F=18$  kHz, une résolution  $R=4096$  pixels et qui est placée à une distance  $D=10$  cm de la surface à observer ?

# Exercices

- Si on utilise un objectif de focale  $f=50$  mm, quelle est, en centimètre, la distance de travail  $D$  à laquelle il faut placer un objet cylindrique de diamètre  $\Phi=10$  cm pour le contrôler avec une caméra linéaire possédant  $R=6144$  éléments photosensible de côté  $c=10$   $\mu\text{m}$  chacun sachant que l'acquisition des images-lignes est contrôlée par un codeur incrémental délivrant  $N=2048$  impulsions par tour et que l'on souhaite obtenir une précision transversale égale à la précision longitudinale.

# Vision industrielle

## Dispositif de capture d'image

