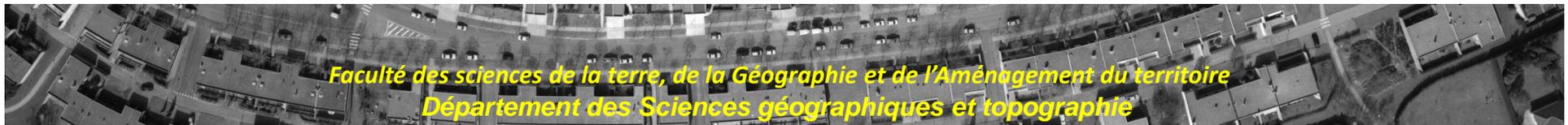




# Cours de photogrammétrie1

Établi par: Mr. M.T. MEDERBAL  
[mtmederbal@gmail.com](mailto:mtmederbal@gmail.com)



Chapitre I:  
**GÉNÉRALITÉS**



# Introduction



## Finalité de la topographie?

En schématisant, on peut dire que la topographie a pour objectifs principaux de permettre l'établissement de cartes et de plans graphiques sur lesquels sont représentées, sous forme symbolique, toutes les informations ayant trait à la topologie du terrain et à ses détails naturels et artificiels. Cette cartographie de données existantes permettra par exemple de s'orienter sur le terrain ou bien d'étudier un projet de construction.

### → **Cartographie à grande échelle**

préparation, exécution et suivi d'un chantier de construction

### → **Cartographie à petite échelle**

- Une photographie est une perspective conique et non une représentation plane. De plus, le relief n'apparaît pas sur une photographie
- Une photographie ne permet pas d'obtenir une échelle constante et précise sur toute sa surface.
- Les clichés devront pouvoir être juxtaposés afin d'obtenir des cartes plus étendues
- Tous les détails du terrain ne sont pas visibles sur un cliché, certains sont cachés
- Les détails visibles sur un cliché ne sont pas toujours faciles à identifier pour des non-spécialistes : nous ne sommes pas habitués à la vision « cartographique » de notre environnement.

# Définition de la photogrammétrie

---



« Toute technique de mesure qui permet de modéliser un espace 3D en utilisant des images 2D » **ENSG IGN**

« Une technique de mesure pour laquelle les coordonnées en trois dimensions des points d'un objet sont déterminées par des mesures faites en deux images photographiques (ou plus) prises à partir de positions différentes » **Wikipedia**

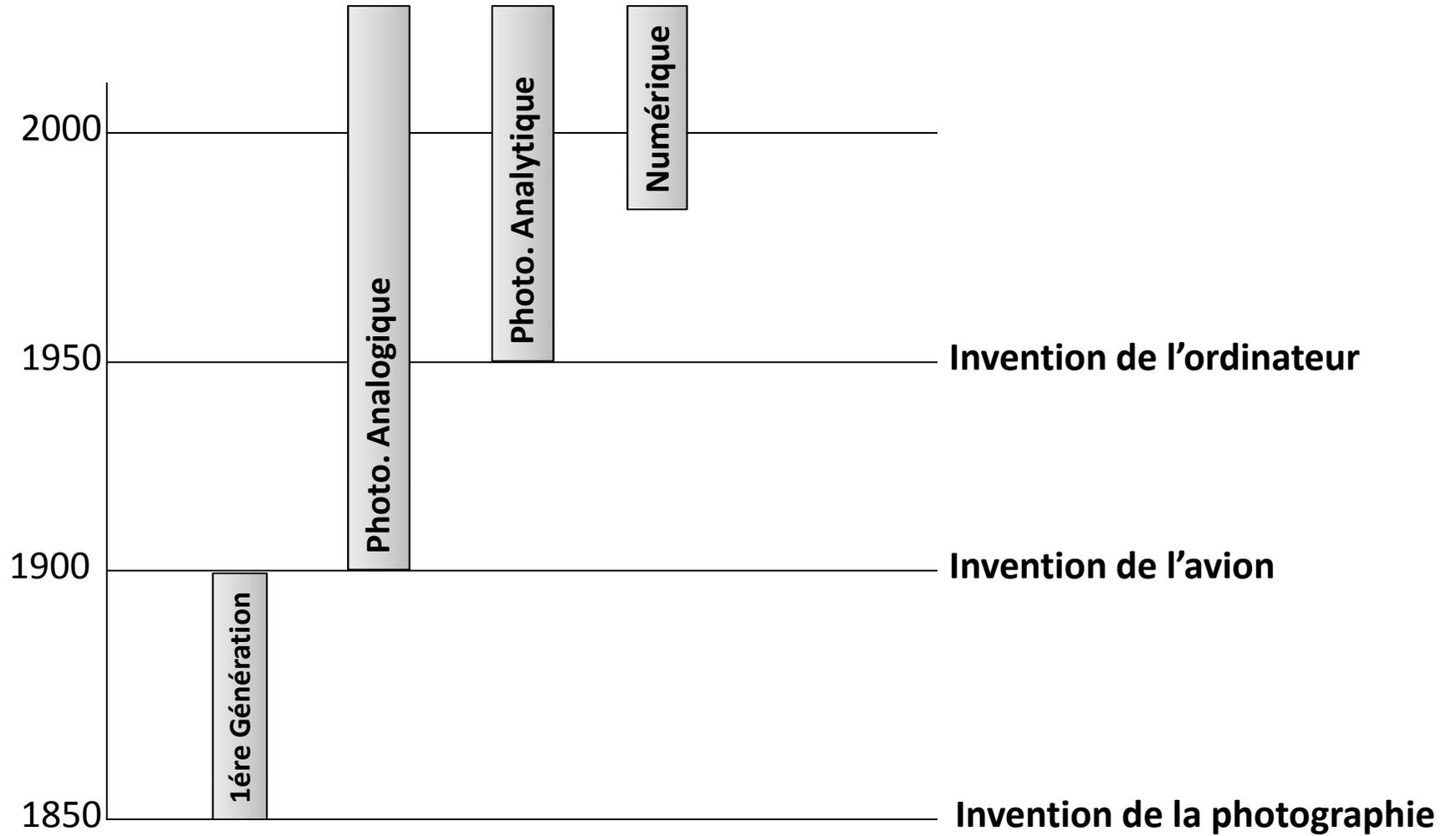
"Photogrammétrie est l'art, la science et la technologie d'obtenir des informations fiables sur les objets physiques et de l'environnement à travers les processus d'enregistrement, la mesure et l'interprétation des images photographiques et des modèles d'énergie de rayonnement électromagnétique et d'autres phénomènes."

(ASPRS, 1980)

Mais la photogrammétrie n'est pas qu'une technique de mesure et de calcul plus ou moins sophistiquée.

C'est un ensemble de domaines où se mélangent la précision et l'esthétique, l'infiniment grand et l'infiniment petit.

# Historique



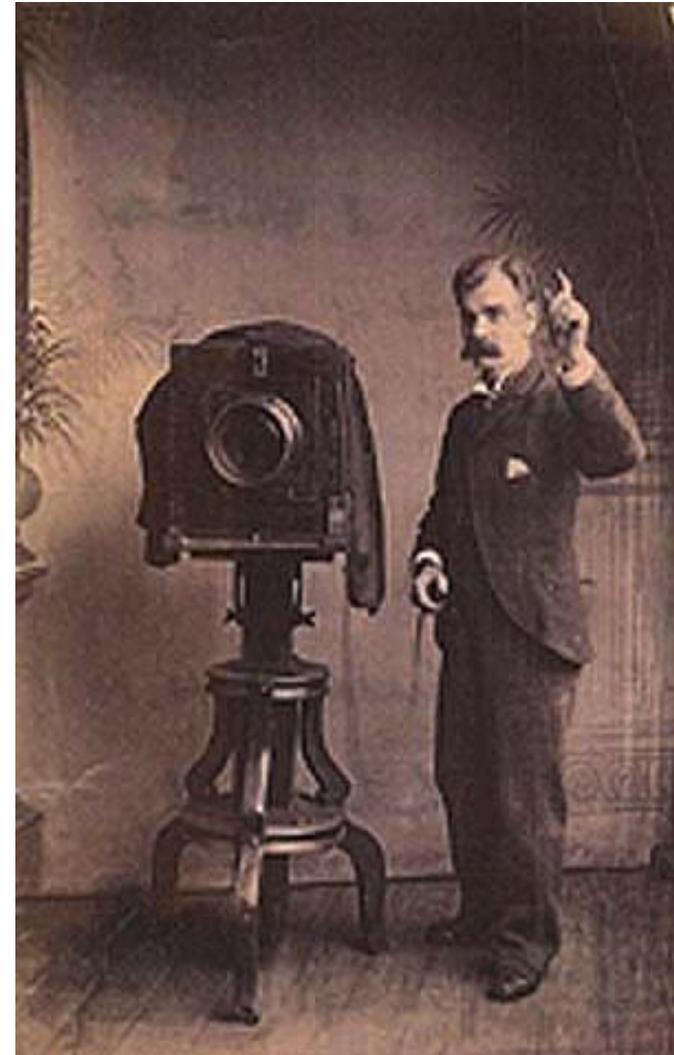
# Historique



- 1826: Joseph Nicéphore Niépce utilise une chambre noire pour la réalisation de la première photographie représente une partie de sa propriété (temps d'exposition de 8 heures).



- 1839: Louis Daguerre de Paris poursuit l'amélioration du procédé. En trouvant le moyen de raccourcir le temps de pose à quelques dizaines de minutes.



# Historique



- 1849: Aimé Laussedat premiers applicateurs scientifiques de l'outil photographique à la cartographie, en 1858 le début des expériences sur la photographie aérienne, En 1862, les méthodes d'arpentage à partir de relevés photographiques proposées par le capitaine Laussedat sont officiellement acceptées par l'académie des sciences de Madrid.
- 1858: la première photo à partir du ballon par Nadar.



# Historique



- 1858: Albrecht Meydenbauer, le développement des techniques photogrammétrique pour l'architecture (terrestre). Et en 1885 il crée le premier institue de photogrammétrie.
- 1896: Édouard-Gaston Deville met au point le premier restituteur stéréoscopique.



Boston par Black et King (1860)



# Historique



- 1902: invention de l'avion par les frères Wright  
L'avion a été utilisé la première fois en 1913 pour l'obtention de photographies à des fins de cartographie.



# Historique



- Les photos aériennes ont été largement utilisés pendant la Première Guerre, principalement dans la reconnaissance.



# Historique



- Dans la période entre la Première Guerre mondiale et La Seconde Guerre, la photogrammétrie aérienne pour la cartographie topographique a progressé au point de la production de masse de cartes.



# Historique



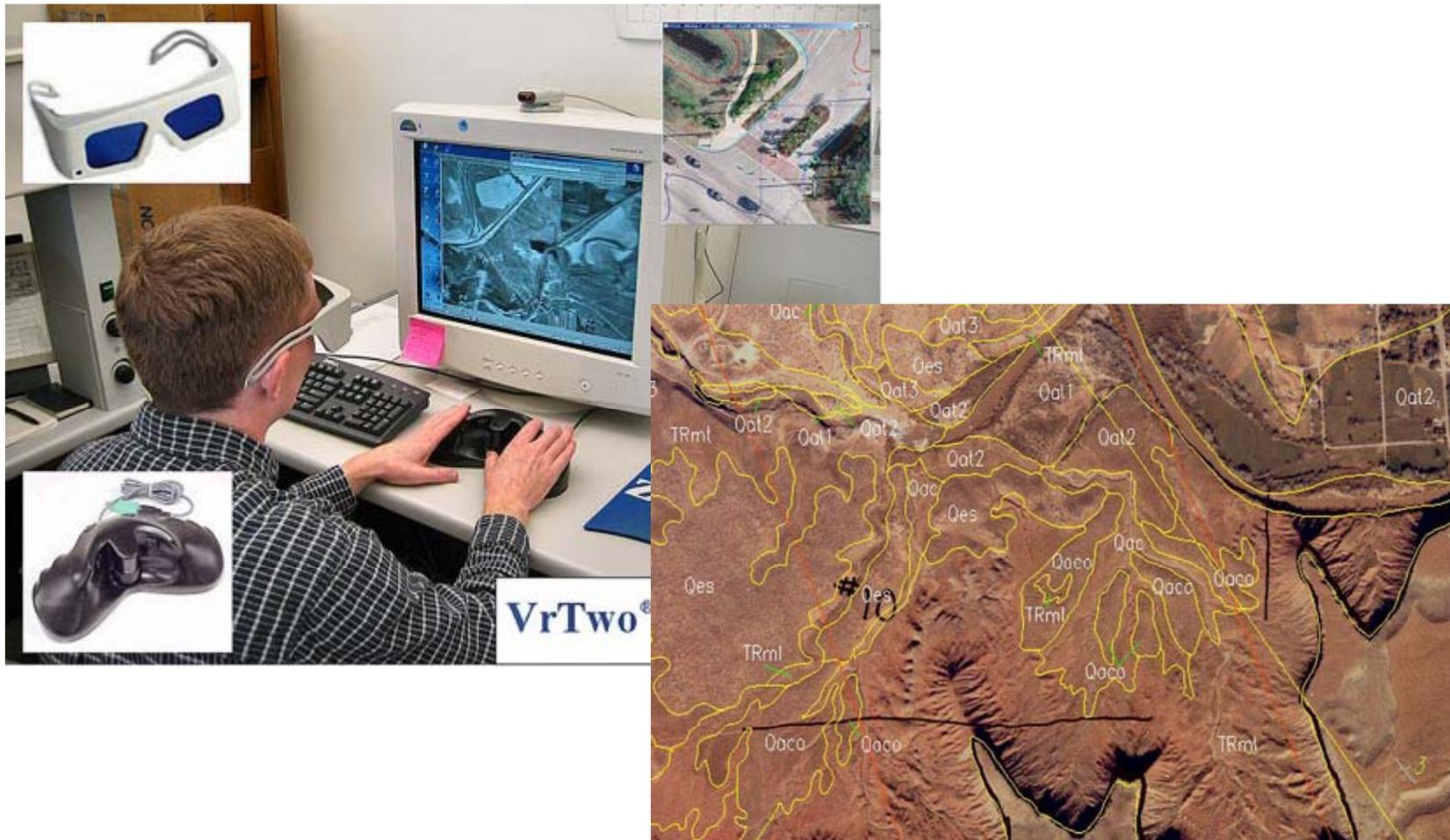
- 1970's: début d'utilisation des instruments analytiques initié par Uki Helava en 1956.



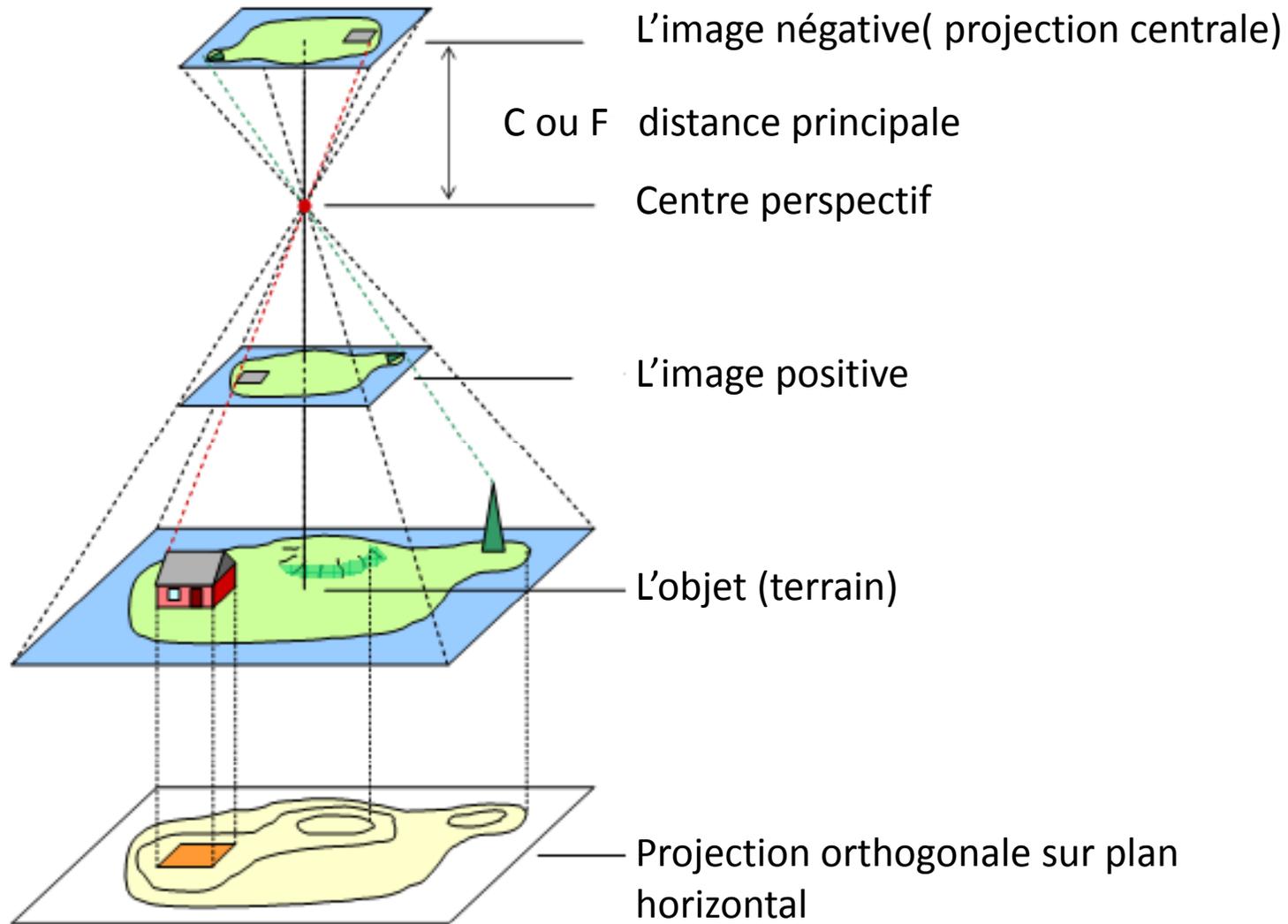
# Historique



- 1980's: développement des ordinateurs et l'apparition du premier système photogrammétrique numérique commercial KERN DSP-1 en 1988



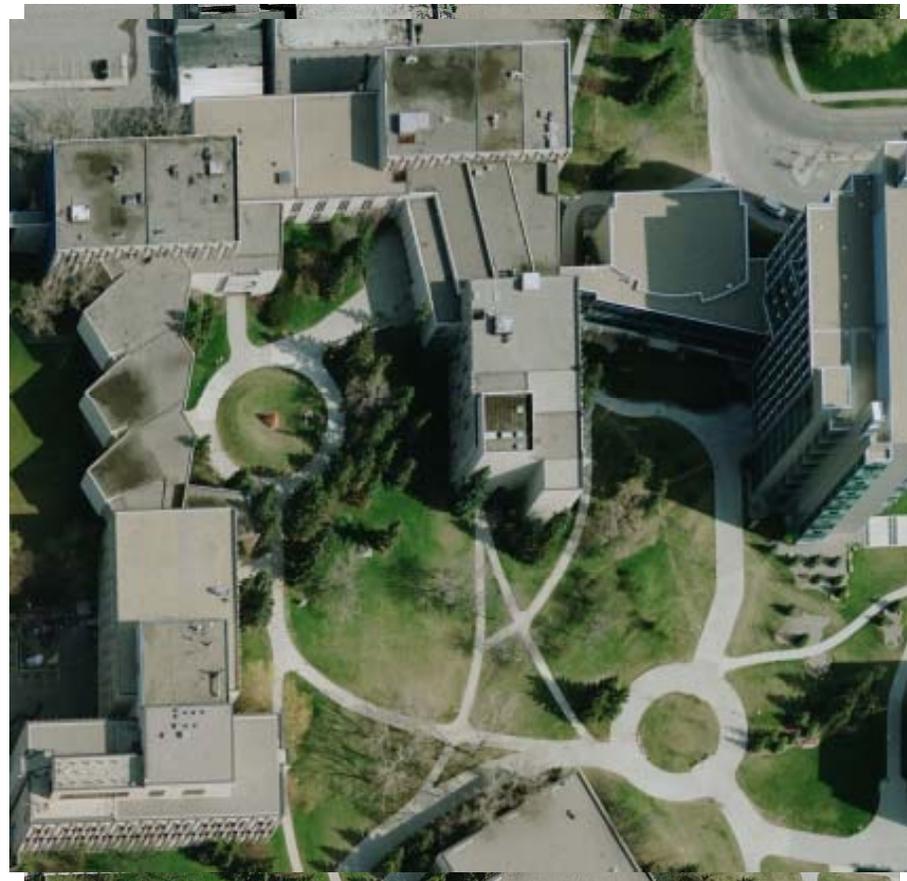
# Principe de la prise de vue photogrammétrique



# Différence entre carte et photographie aérienne



	Carte	Photo aérienne
Projection	Orthogonale	Centrale
Information	implicite	explicite
données	Qlq Kb	0.5 Gb



# Type de photogrammétrie



On peut cataloguer les applications photogrammétriques selon plusieurs critères : l'origine des images, le mode de traitement utilisé ou la géométrie.

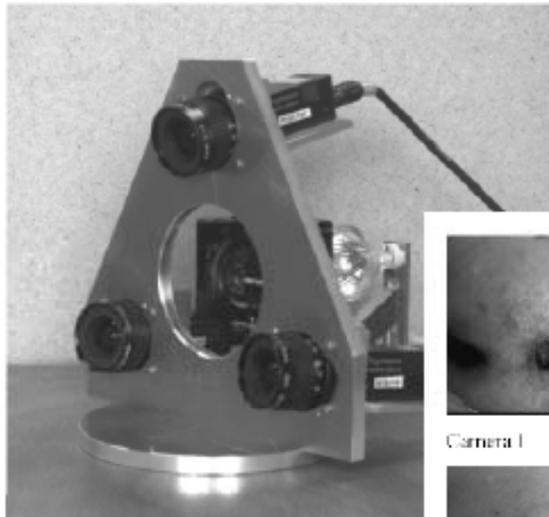
Terrestres (axe  $\pm$  horizontal, distance de 0 à 100 m)



# Type de photogrammétrie



Terrestres (axe  $\pm$  horizontal, distance de 0 à 100 m)



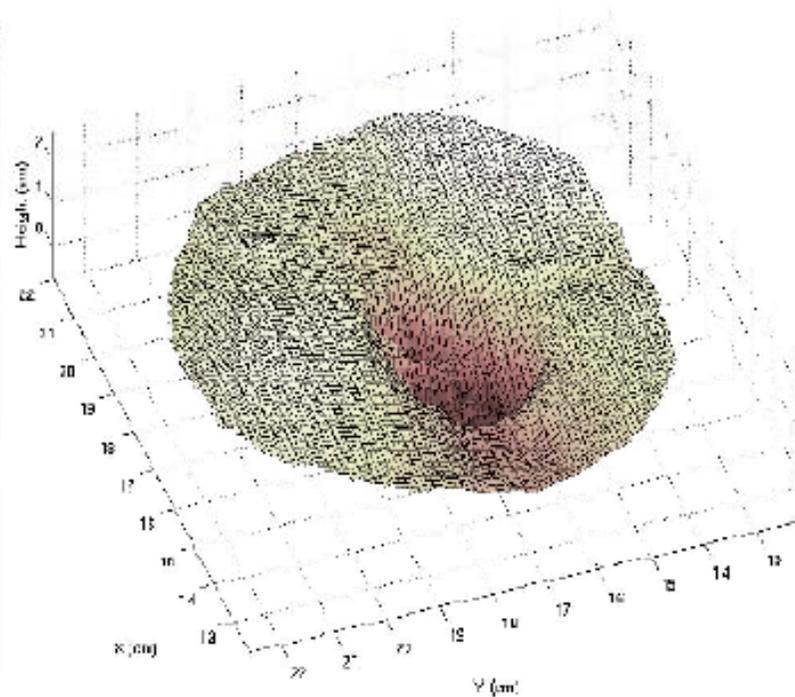
Camera 1



Camera 2



Camera 3



# Type de photogrammétrie



aériennes (axe  $\pm$  vertical, distance de 100 à 10'000 m)



# Type de photogrammétrie



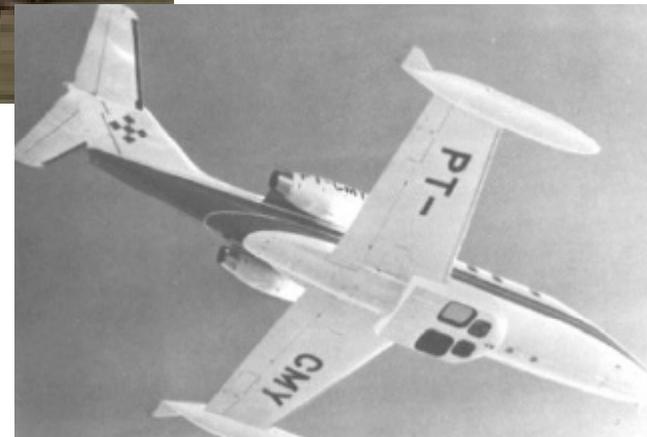
aériennes (axe  $\pm$  vertical, distance de 100 à 10'000 m)



# Type de photogrammétrie



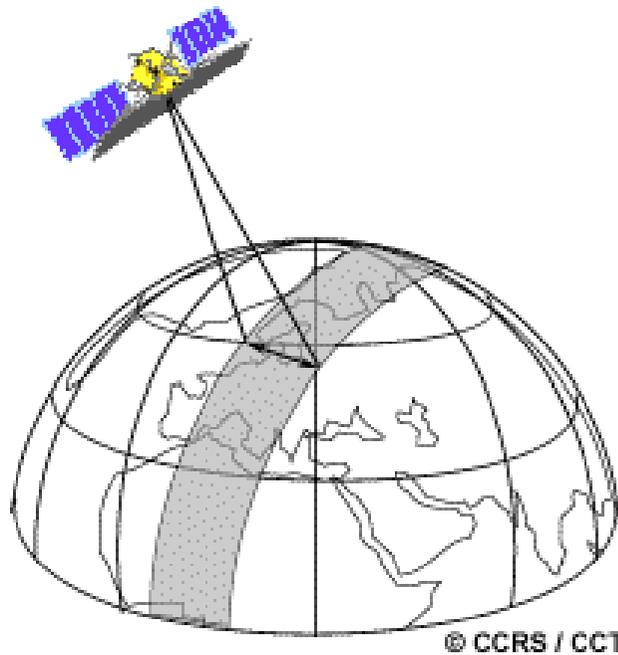
aériennes (axe  $\pm$  vertical, distance de 100 à 10'000 m)



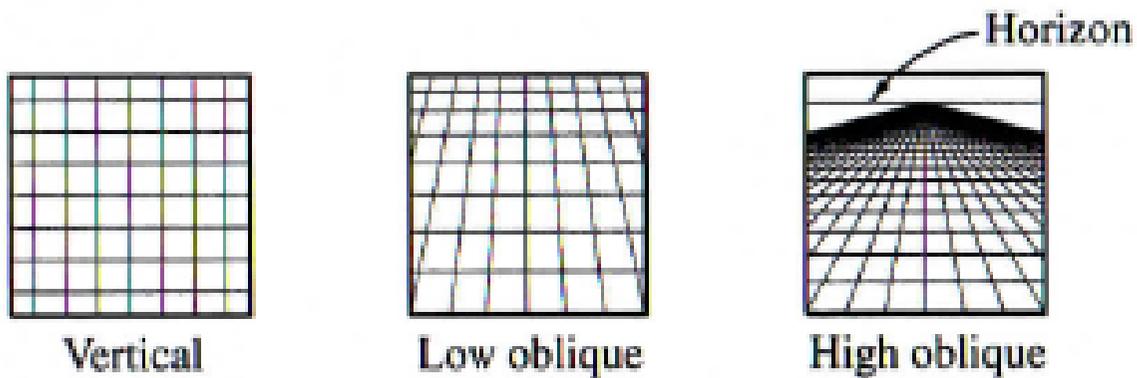
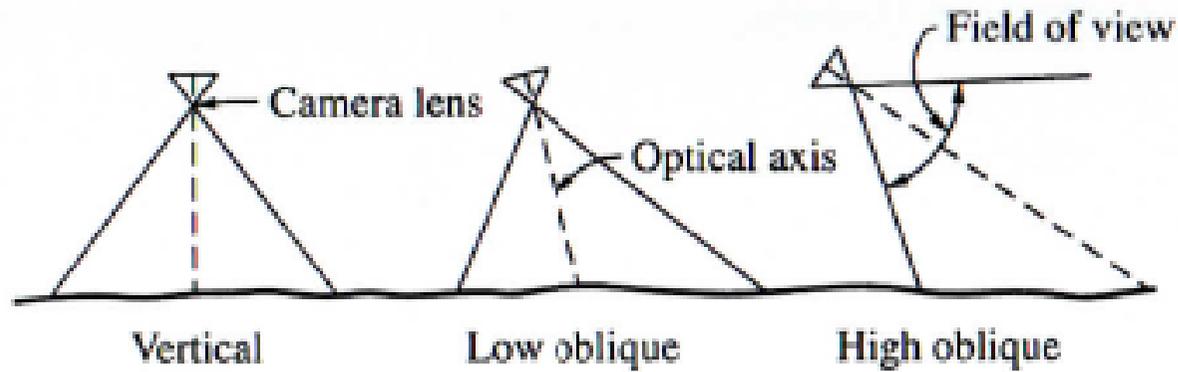
# Type de photogrammétrie



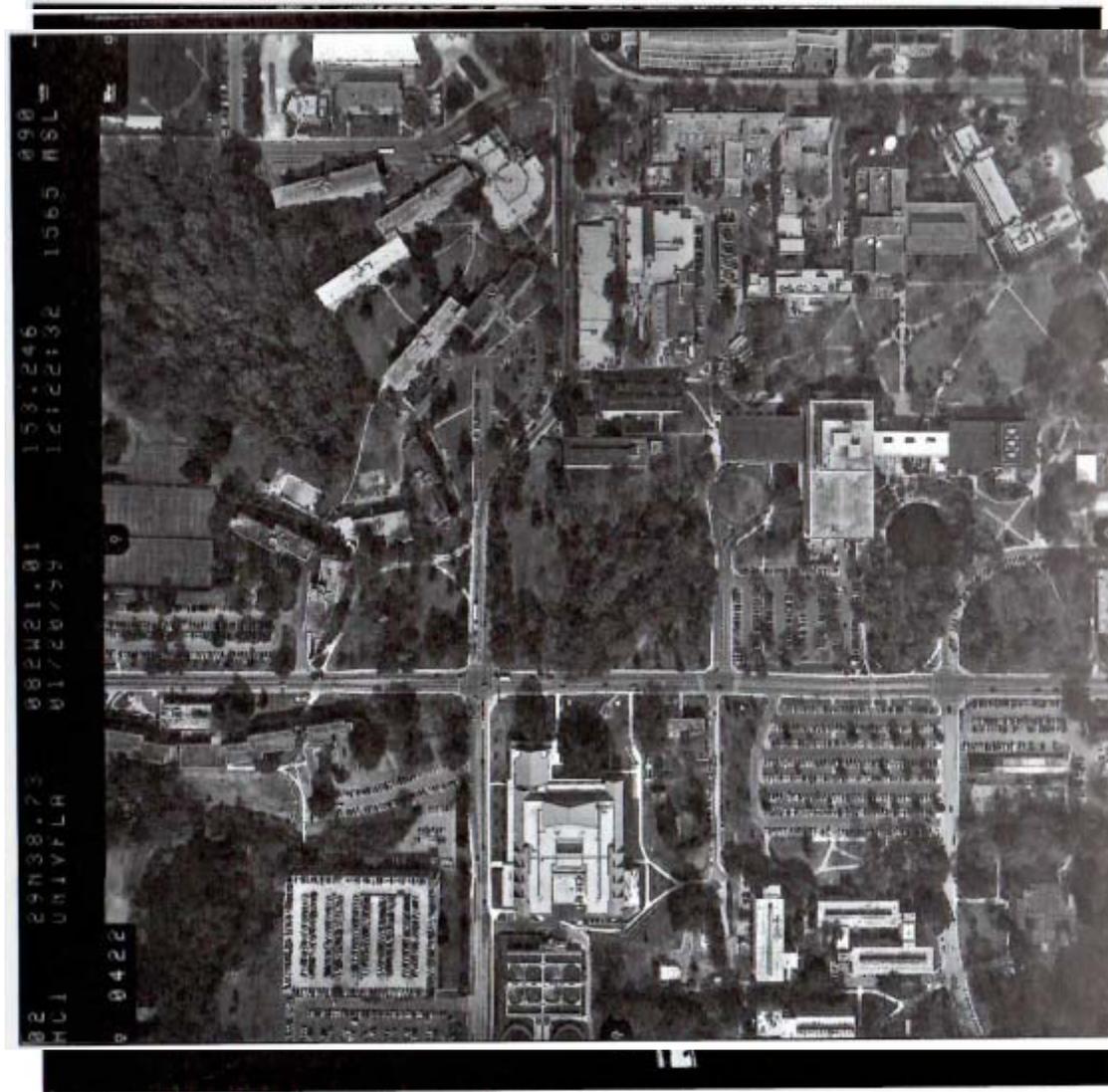
spatiales / satellitaires (axe  $\pm$  vertical, distance de 200 à 800 km)



# Type de photogrammétrie



# Type de photogrammétrie



# Approche méthodologique en photogrammétrie



**Préparation & documentation**



**Acquisition:**

plan de vol, aspect matériel, chantier photogrammétrique



**Traitement:**

Calcul de réseau de points, calcul d'ajustement photogrammétrique, aérotriangulation,



**Restitution:**

Génération de MNT, restitution vectorielle 3D, orthophoto



**Représentation:**

Intégration dans SIG, représentation cartographique, visualisation 3D, représentation web

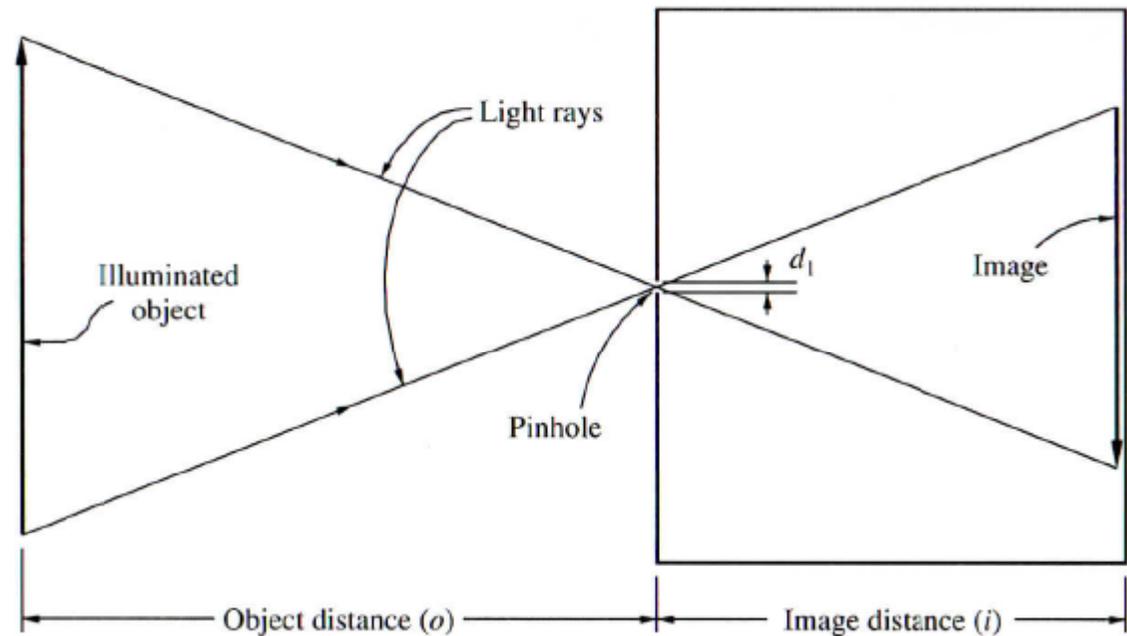
Chapitre II:  
**Principe de la photographie et de  
l'imagerie**



# Introduction



Photographie, qui signifie « dessiner avec la lumière », cette définition connue bien avant que la caméras et les films photographiques sensibles à la lumière est entré en usage. Les Anciens Arabes ont découvert que lorsque à l'intérieur d'une tente sombre, ils ont pu observer des images inversées des objets extérieurs éclairés.



En 1839, Louis Daguerre de France a développé un film photographique qui pourrait capturer un enregistrement permanent d'images illuminée. En plaçant ce film dans une «boîte à sténopé » .

Des améliorations considérables ont été faits dans les films photographiques et caméras cinématographiques au fil des ans; cependant, leur principe de base a demeuré essentiellement inchangé.

# Notions Fondamentales d'Optique

---



La photographie analogique est numérique dépendent essentiellement des éléments de l'optiques, notamment de lentilles, Ainsi une compréhension de certains des principes fondamentales de l'optique est essentielle pour l'étude de la photographie et de l'imagerie.

La science de l'optique se compose de deux principales branches:

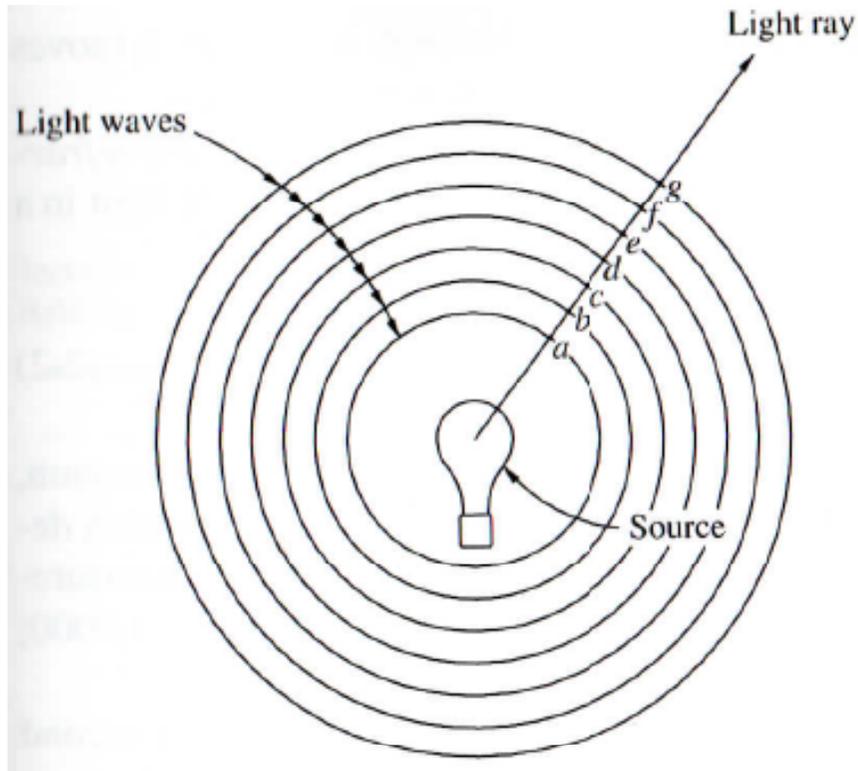
***l'optique physique*** et ***l'optique de Géométrie***.

# Notions Fondamentales d'Optique



## Optique physique

la lumière est considérée comme une série d'ondes électromagnétiques émanant d'une source ponctuelle se déplaçant à travers un support de transmission tel que l'air. Conceptuellement, cela peut être visualisé comme un groupe de cercles concentriques en expansion loin d'une source de lumière, chaque onde lumineuse a sa propre fréquence, amplitude et sa longueur d'onde.



La vitesse de l'onde est liée à la fréquence et longueur d'onde selon l'équation

$$V = f\lambda$$

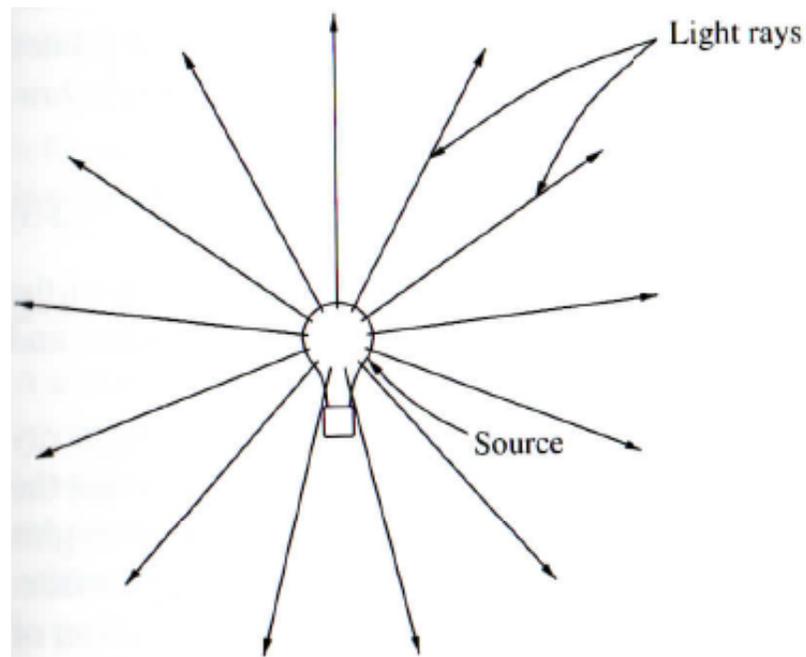
La vitesse de la lumière dans le vide est  $2.9979246 \times 10^8$  (m / s).

# Notions Fondamentales d'Optique



## Optique géométrique

En optique Géométrique, la lumière se déplace d'un point source à travers une milieu de transmission dans les lignes droites appelées rayons lumineux.  
L'ensemble du groupe de lignes rayonnant est appelé un paquet



# Notions Fondamentales d'Optique

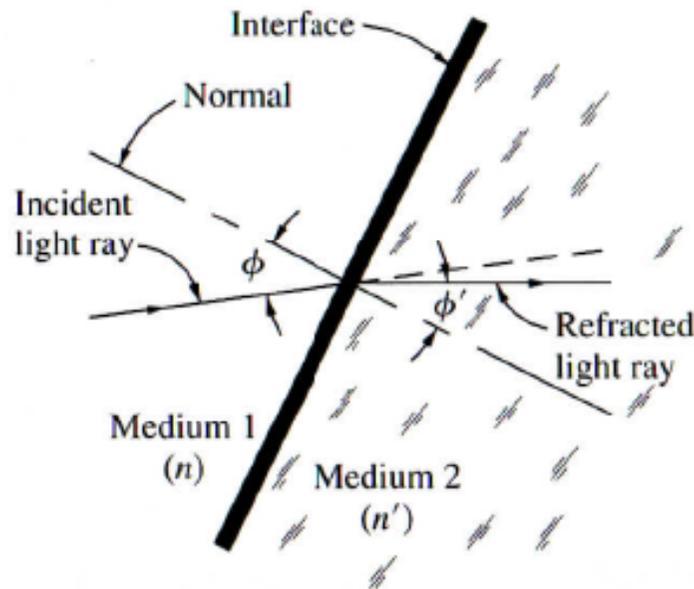


## Optique géométrique

Lorsque la lumière passe d'un matériau transmettant à un autre, il subit un changement de vitesse en fonction de la composition des substances qu'il traverse. Lumière atteint sa vitesse maximale voyager dans le vide, il se déplace plus lentement dans l'air, et se déplace encore plus lentement dans l'eau et le verre.

La vitesse à laquelle la lumière se déplace à travers une substance est représentée par l'indice de réfraction du matériau

$$n = \frac{c}{V}$$



L'indice de réfraction est déterminé par la mesure expérimentale. Le vide, 1,0000; l'air 1,0003; l'eau 1,33; le verre de 1,5 à 2,0.

Lorsque les rayons lumineux passent d'un milieu à un autre le trajet du rayon lumineux est réfracté

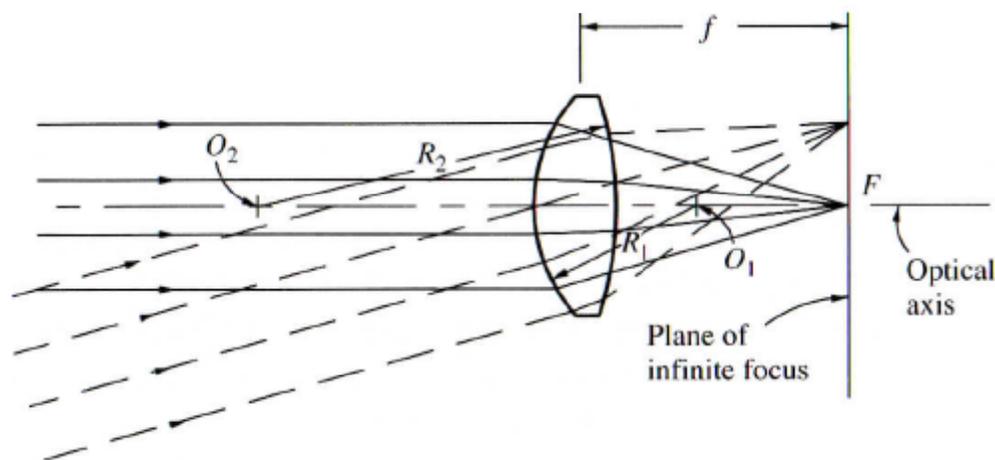
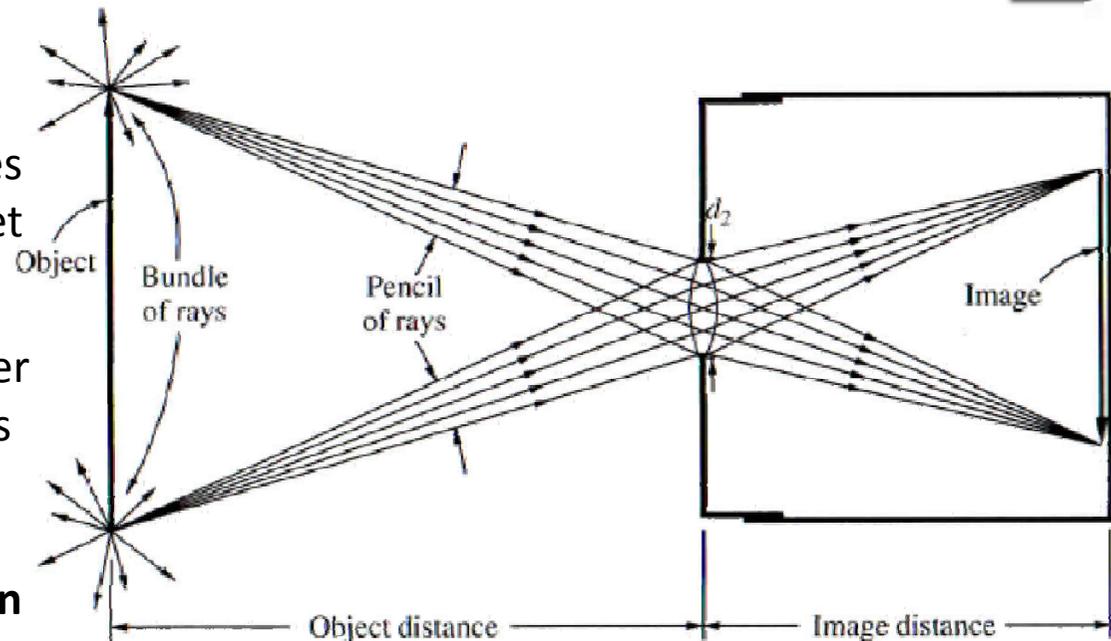
$$n \sin \phi = n' \sin \phi'$$

# lentilles



Une lentille simple, se compose d'un morceau de verre optique qui a été broyé de sorte qu'il a soit deux surfaces sphériques ou une surface sphérique et une surface plane.

Sa fonction principale est de rassembler les rayons de lumière à partir de points d'objets et de les amener à se concentrer à une certaine distance de l'autre côté de la lentille, appelé le **plan de l'image**.



$F$ , le *point focal* de la lentille.

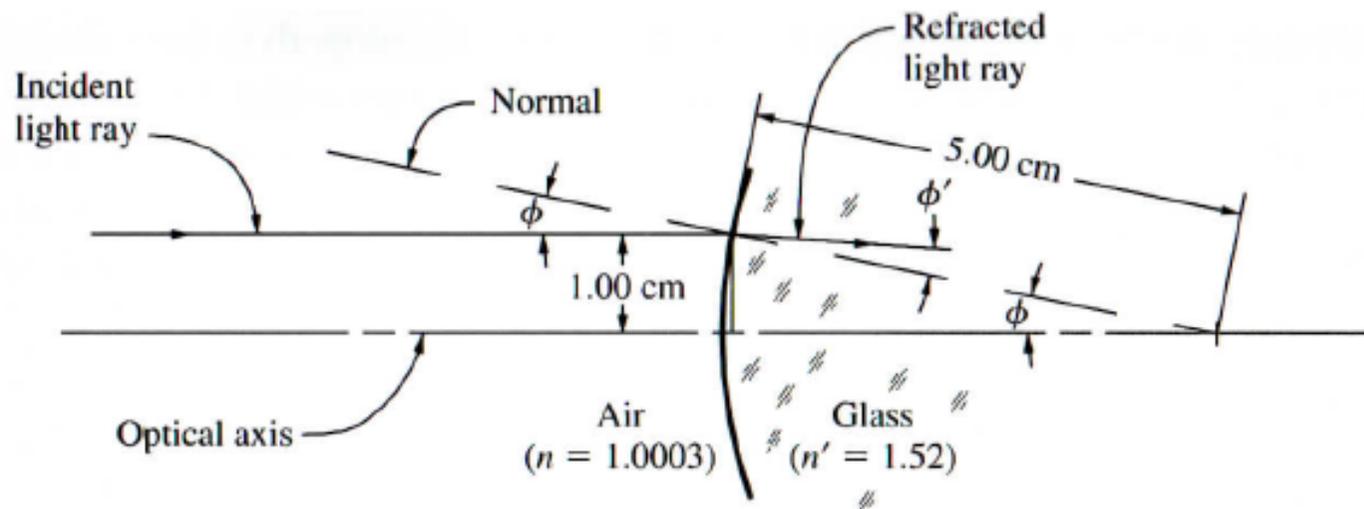
La *distance focale* est La distance entre le point focal et le centre d'une lentille.

# lentilles



## exercice

Un rayon lumineux se déplaçant dans l'air ( $n = 1,0003$ ) entre dans une Lentille de verre convexe ( $n' = 1,52$ ) ayant un rayon de 5,00 centimètres (cm), comme le montre la figure, si le rayon lumineux est parallèle à l'axe optique de la lentille à une distance de 1,00 cm au-dessus, quel sont les angles d'incidence  $\phi$  et la réfraction  $\phi'$ ?



# lentilles



Un faisceau de rayons lumineux incidents provenant d'un objet situé à l'infinie loin de la lentille sera parallèle, comme illustré et son image sera concentré dans le plan focale. Pour les objets situés à une distance définie de la lentille, son image sera à une distance supérieure à la distance focale.

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

o la distance d'objet de la lentille  
i distance de l'image de la lentille  
f est la distance focale

## exercice

Trouver à quel distance sera l'image pour d'un objet se trouvant à 50,0 m de la lentille d'une focale de 50,0 cm.

# lentilles

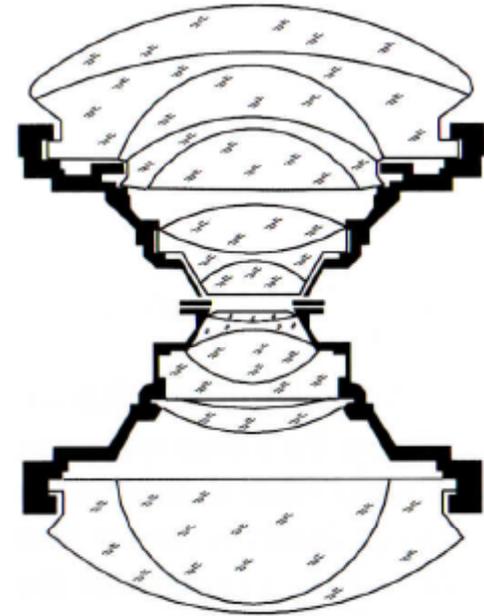


L'analyse précédente a été simplifiée pour des lentilles avec des épaisseurs négligeables.

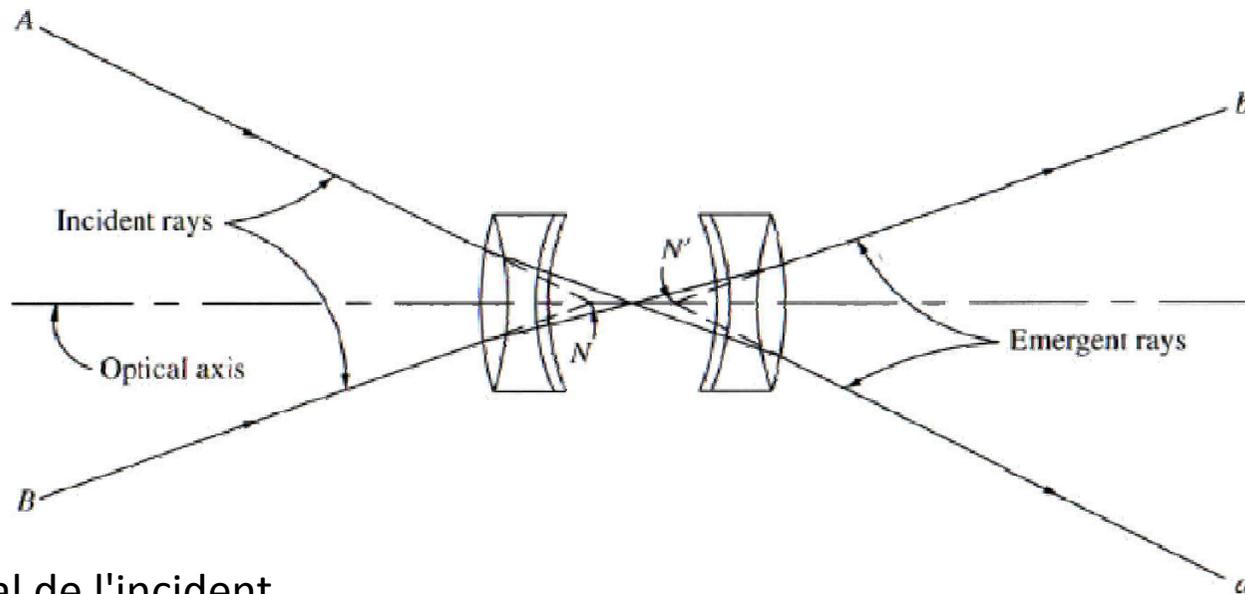
Avec des lentilles épaisses, cette hypothèse n'est plus valable.

Une lentille épaisse peut être constituée d'un seul élément d'épaisseur unique ou une combinaison de deux ou plusieurs éléments liés.

La figure présente une combinaison de lentille épaisse utilisée dans une caméra aérienne. Notez qu'il est constitué de 15 éléments individuels



# lentilles



N' le point nodal émergent

Ils ont la propriété de se trouver sur l'axe optique et tout rayon de lumineux traversant la lentille passe par le point nodal incident et sort de l'autre côté par le point nodal émergent dans une direction parallèle

Il est impossible pour une seule lentille pour produire une image parfaite; Elle peut être un peu floue et déformée géométriquement. Grâce à l'utilisation de lentilles supplémentaires, les concepteurs de lentilles sont en mesure de corriger les aberrations dans des limites tolérables.

# luminance / l'éclairement lumineux



est la luminosité ou la quantité de lumière reçue dans le plan image par unité de surface pendant l'exposition.

$$\sqrt{\frac{d^2}{f^2}} = \frac{d}{f} \text{ Facteur de luminosité}$$

« d » diamètre de l'ouverture de l'objectif.

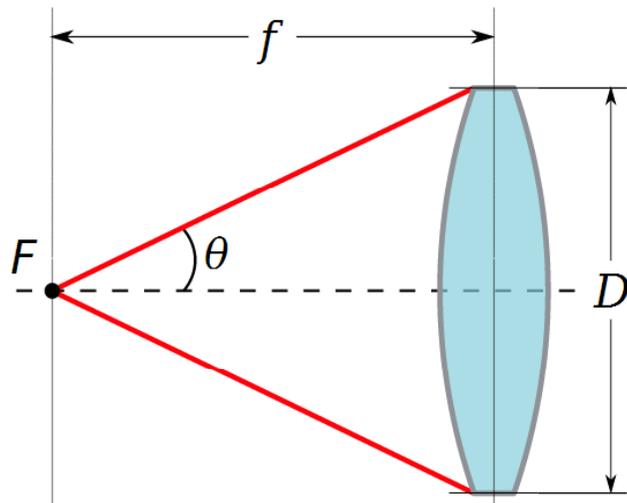
« f » distance focale

L'**ouverture relative** d'un objectif photographique, appelée plus couramment **ouverture**, est le rapport entre la distance focale de cet objectif et le diamètre de sa pupille d'entrée.

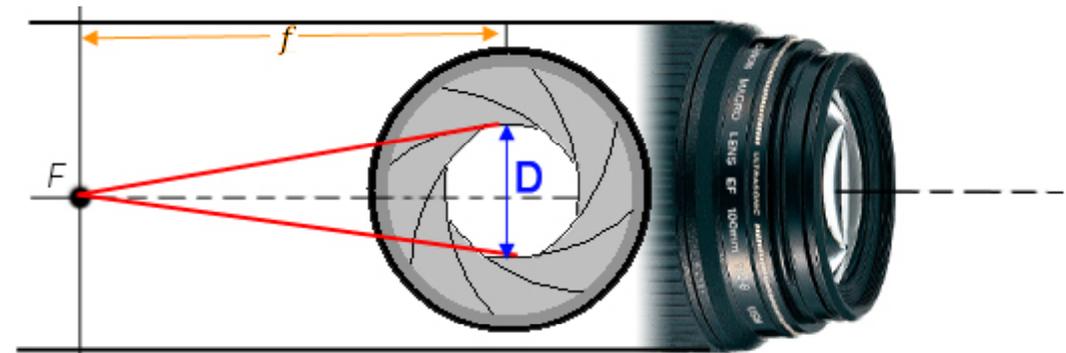
# luminance / l'éclairement lumineux



L'**ouverture relative** d'un objectif photographique, appelée plus couramment **ouverture**, est le rapport entre la distance focale de cet objectif et le diamètre de sa pupille d'entrée.



$$f\text{-stop} = \frac{f}{d}$$



# Relations entre l'ouverture et la vitesse d'obturation



L'exposition totale du film de photographie est également le produit de l'éclairement et le temps d'exposition

En faisant des expositions photographiques, les quantités exactes de l'éclairement et le temps peuvent être corrélées à l'aide d'un photomètre. Éclairement est réglée en faisant varier / arrêt réglages de l'appareil, tandis que le temps d'exposition est réglée en faisant varier la vitesse d'obturation.

Les variations des paramètres de / d'arrêt sont en fait des variations dans le diamètre de l'ouverture, qui peut être commandé avec un diaphragme d'un bouclier circulaire qui se élargit ou se contracte, en changeant le diamètre de l'ouverture de la lentille et régulant ainsi la quantité de lumière qui est autorisée pour passer à travers la lentille.



Comparaison de  $f / 32$  (coin supérieur gauche) et  $f / 5$  (coin inférieur droit)

# Relations entre l'ouverture et la vitesse d'obturation

---



La relation entre l'ouverture et la vitesse d'obturation conduit à des variations intéressantes pour obtenir une exposition correcte.

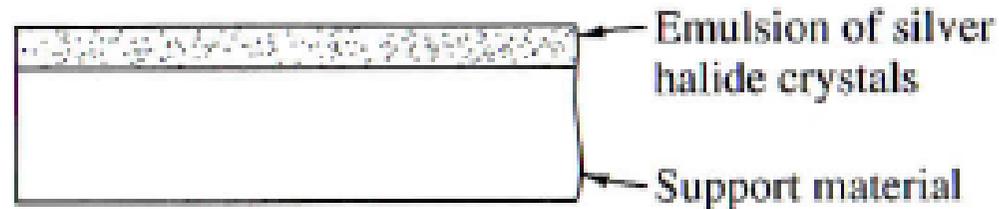
## **exercice**

Supposons qu'un film photographique est exposée de façon optimale avec un réglage de f-stop dans la position f-4 et une vitesse d'obturation de  $1/500$  s. Quel est le bon réglage f-stop si la vitesse d'obturation est modifiée pour  $1/1000$  s?

# Caractéristiques de Photographie à Emulsions



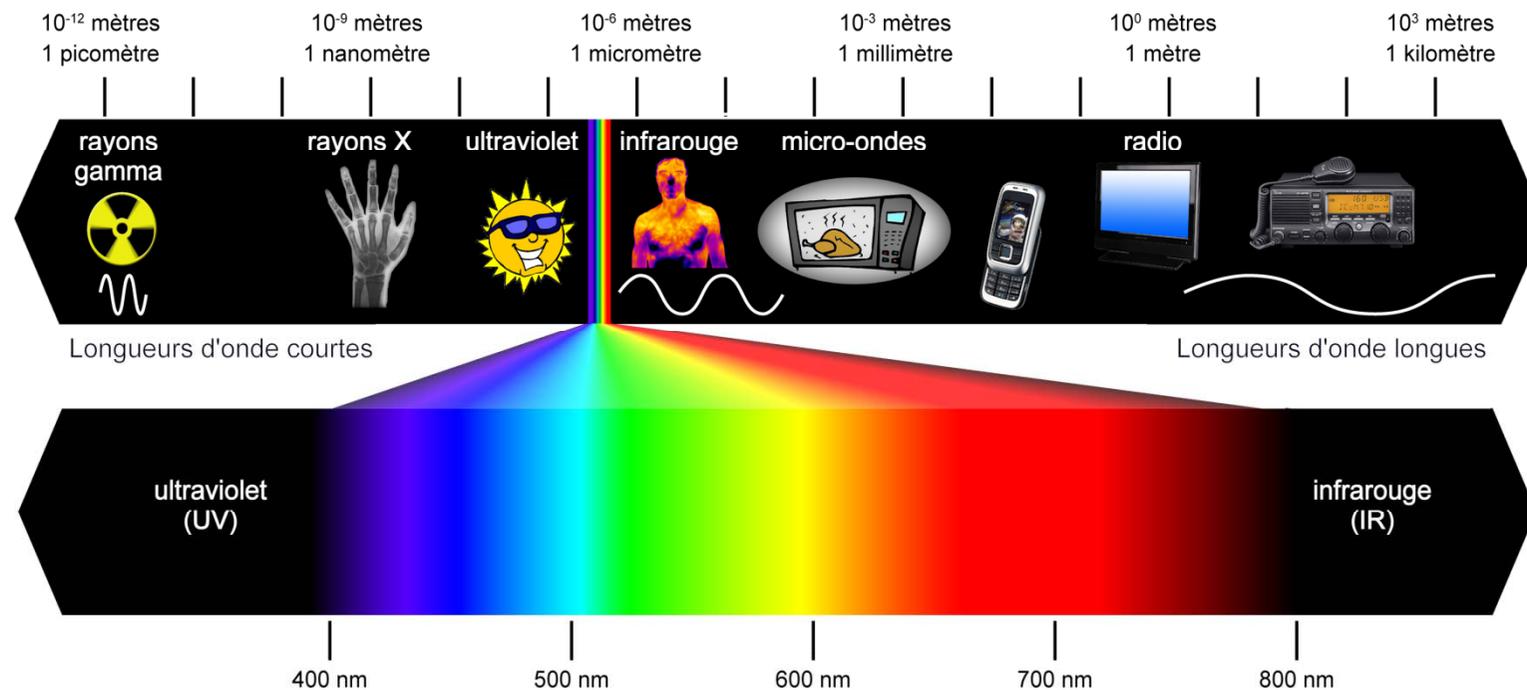
Les films photographiques se composent de deux parties: l'émulsion et le support. L'émulsion sensible à la lumière contient des cristaux d'halogénure d'argent. Ces derniers sont placés sur le support dans une couche mince, Le matériau de support est généralement en papier, film plastique, ou en verre.



# Sensibilité spectrale des émulsions



Le soleil et diverses sources artificielles telles que les ampoules émettent une large gamme d'énergie électromagnétique. L'ensemble de la plage de cette énergie électromagnétique est appelé spectre électromagnétique. Rayons X, les rayons lumineux visibles, et les ondes radio sont quelques exemples familiers de variations de l'énergie dans le spectre électromagnétique.

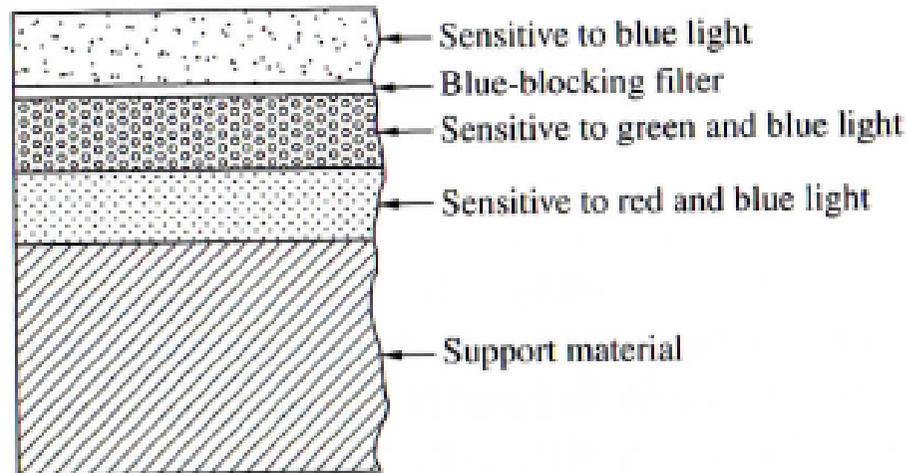


# Sensibilité spectrale des émulsions

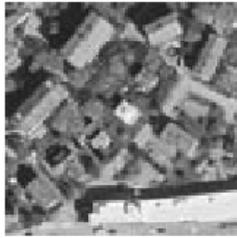


Tout comme la rétine de l'œil humain est sensible aux variations de longueur d'onde, des émulsions photographiques peuvent également être fabriquées avec des variations de sensibilité de longueur d'onde.

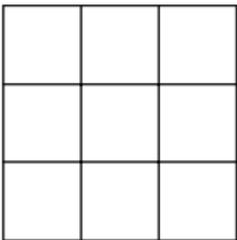
Émulsions couleur normale et Couleur infrarouges trouvent largement son utilisation dans la photogrammétrie. En faisant une exposition couleur, la lumière pénètre dans l'appareil et sensibilise la couche (s) de l'émulsion qui correspond (ent) à la couleur ou combinaison de couleurs de la scène originale.



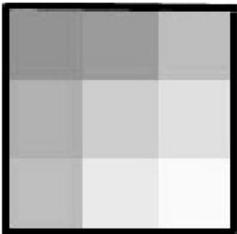
# Image Numérique



- L'image originale ou l'objet



- Diviser en éléments d'image (pixel) se qui donne une matrice de pixels (ligne/ colonne)



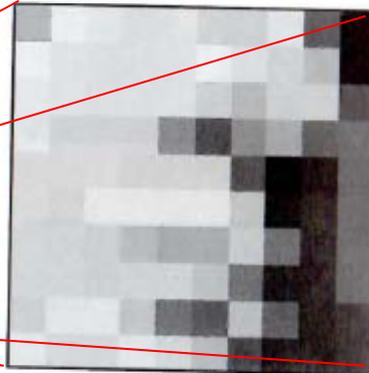
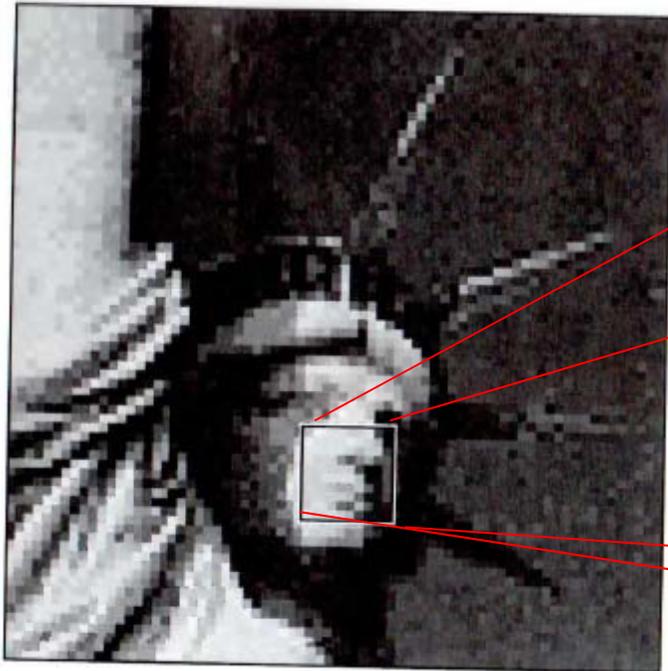
- Stocker les niveau de gris dans chaque pixel. Diviser les différentes tonalités de gris en valeurs de gris discrètes.



93	86	119
133	156	167
141	173	183

- Image numérique

# Image Numérique



190	237	234	223	227	220	219	231	115	2
237	227	223	228	229	237	229	219	190	1
231	227	223	227	229	219	196	216	217	96
229	218	220	219	160	120	164	183	127	136
219	218	219	213	214	210	113	2	54	127
217	213	223	227	223	222	199	54	70	128
219	217	207	196	183	187	207	149	74	126
217	216	210	218	217	203	145	70	73	127
207	223	227	203	145	127	200	136	75	80
227	219	218	223	219	190	115	70	71	74

72 pixels X 72 pixels

Puisque les ordinateurs fonctionnent directement dans le système de numération binaire, il est plus efficace et pratique à utiliser des plages correspondant à des puissances de 2. Les chiffres dans la plage 0 à 255 peuvent être logés par 1 octet (8-bit). Une valeur de 8 bits peut stocker  $2^8$  ou 256 valeurs, ce qui correspond exactement à la gamme de 0 à 255

L'image nécessiterait un total de  $72 \times 72 = 5184$  octets de stockage informatique

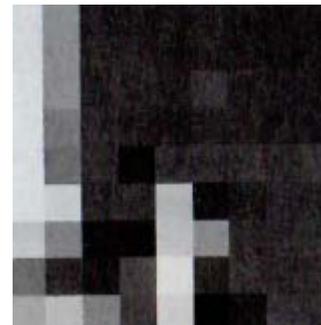
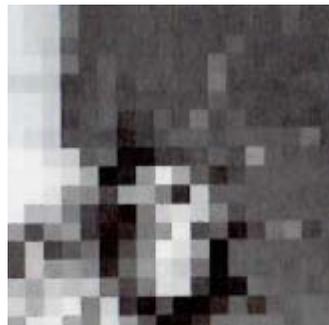
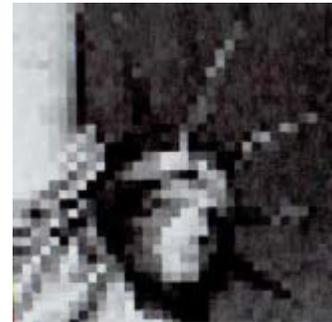
# Image Numérique



Les images numériques sont produites par un procédé dénommé échantillonnage. Dans ce processus, une petite zone de l'image (un pixel) est « détecté » pour déterminer la quantité d'énergie électromagnétique émise par l'élément correspondant de la surface sur l'objet.

Échantillonnage discret d'une image a deux caractéristiques fondamentales, la résolution de géométrique et la résolution radiométrique.

**La résolution Géométrique(ou spatiale)** fait référence à la taille physique d'un pixel individuel, avec des tailles de pixels plus petits correspondant à une résolution plus élevée.



# Image Numérique



**la résolution radiométrique** : on trouve la quantification qui est la conversion de l'amplitude de l'énergie électromagnétique d'origine (signal analogique) en un certain nombre de niveaux discrets (signal numérique).



l'image d'origine avec  
256 niveaux ( $2^8$ )



l'image d'origine avec  
8 niveaux ( $2^3=8$ ) 3-bit



l'image d'origine avec  
4 niveaux ( $2^2=4$ ) 2-bit

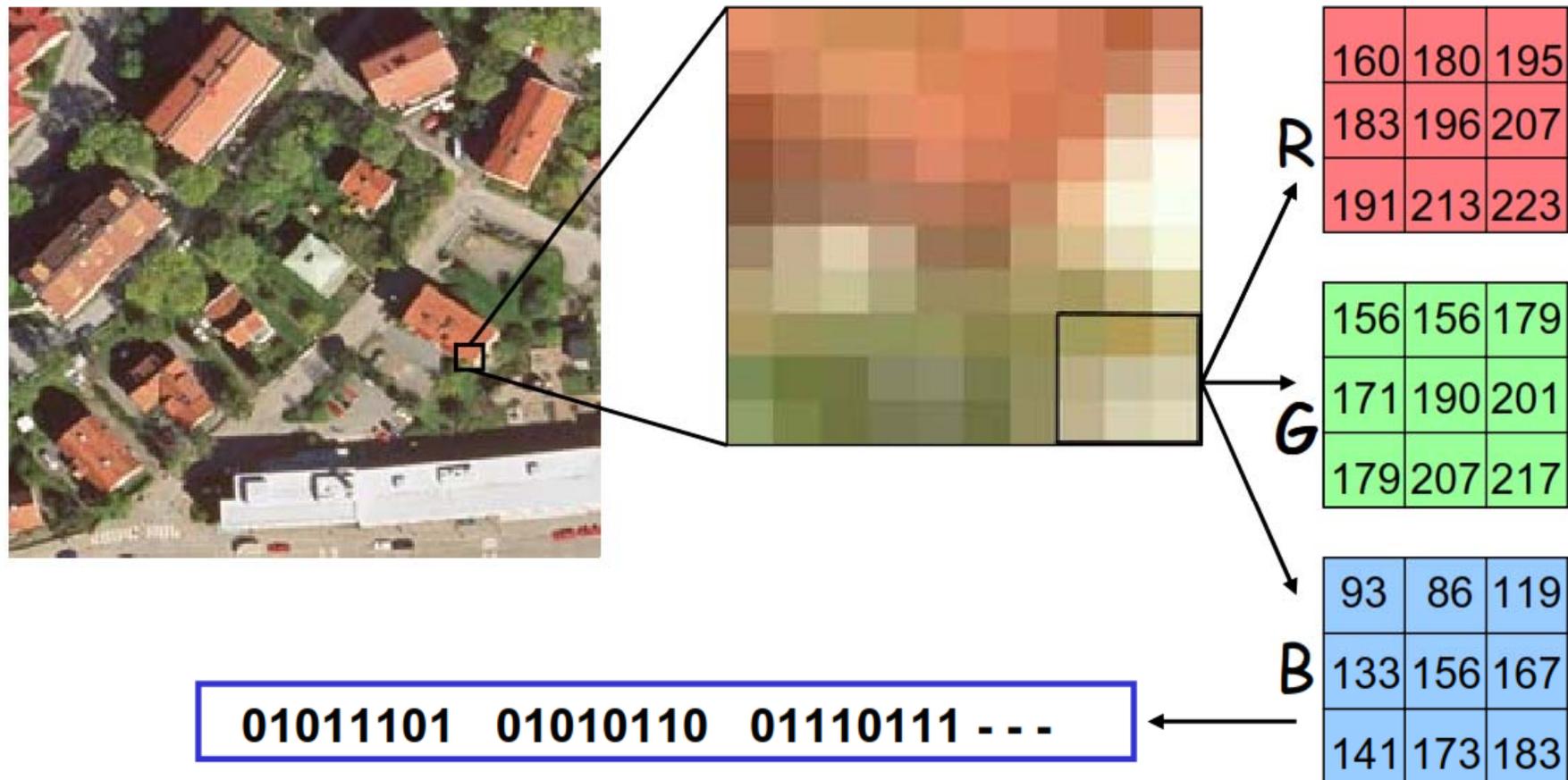


l'image d'origine avec  
2 niveaux ( $2^1=2$ ) 1-bit

# Image Numérique



La **résolution spectrale** peut être expliquée aussi par le nombre de canaux ou bandes spectrales acquis simultanément. Ce nombre varie de un (panchromatique, *toutes les couleurs visibles résumées en un ton de gris*) à plusieurs centaines pour des capteurs hyperspectraux tels que AVIRIS. La majorité des capteurs photogrammétriques acquièrent trois, quatre canaux (bleu, vert, rouge et parfois proche infrarouge).



# Image Numérique

---



## Exercice

Une image satellite de 3000-ligne par 3000-colonne a trois canaux spectraux. Si chaque pixel est codé en 8 bits (1 octet) par canal, quel est le nombre d'octets requis pour stocker l'image? Si cette image est transférée sur une ligne de réseau informatique ayant une vitesse de transfert de données de 100 000 octets par seconde (octets / s), combien de temps faut-il pour transférer l'image?

# Exercices



1. Sous certaines conditions, la vitesse de la lumière dans l'air est  $2,99688 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Quel l'indice de réfraction de l'air dans ces conditions?
2. Une certaine énergie électromagnétique se propage dans le vide à une fréquence de 2.361.000 cycles par seconde. Quelle est la longueur d'onde (au mètre près) de cette énergie?
3. La longueur d'onde de la lumière visible varie de 0,4 à 0,7  $\mu\text{m}$ . Exprimez cette gamme en termes de fréquence (au cycle le plus proche par seconde), basée sur la vitesse de la lumière dans le vide.
4. Si un certain type de verre a un indice de réfraction de 1,550, quelle est la vitesse de la lumière à travers ce verre?
5. Un rayon de lumière pénètre dans le verre (index 1,570) de l'air (indice 1,0003) à un angle d'incidence de  $36,9^\circ$ . Trouver l'angle de réfraction.
6. Un rayon de lumière pénètre dans le verre (index 1,515) de l'air (indice 1,0003) à un angle d'incidence de  $67,8^\circ$ . Trouver l'angle de réfraction.
7. Un rayon lumineux émanant de l'eau (indice 1,333) fait un angle de  $37,5^\circ$  avec la normale à la surface.
8. Une exposition est optimale à une vitesse d'obturation de  $1 / 250\text{s}$  et f-8. si il est nécessaire de changer la vitesse d'obturation à  $1 / 500\text{s}$ , ce qui devrait être le f-stop correspondant, de conserver une exposition optimale?
9. Répétez le problème si on change la vitesse d'obturation à  $1/125 \text{ s}$ .
10. Une exposition est optimale à une vitesse d'obturation de  $1 / 1000\text{s}$  et f-5,6. Pour augmenter la profondeur de champ, il est nécessaire d'exposer à F-22. Quelle est la vitesse d'obturation nécessaire pour conserver une exposition optimale?

Chapitre III:  
**Dispositifs de prise de vue**



# Introduction

---



La photogrammétrie exige pour des raisons de précision des appareils de prise de vues différents des appareils photographiques ordinaires. Ces appareils doivent permettre de diminuer les défauts métriques de la photographie (les distorsions) et de connaître avec précision ces défauts (étalonnage)

Ce chapitre traite les divers types de dispositifs de prise de vue utilisés dans la cartographie aérienne. mais la caméra standard est présentée dans le plus grand détail. Ceci est principalement en raison de sa large utilisation; Cependant, c'est aussi une approche pratique parce que d'autres dispositifs d'imagerie peuvent alors facilement être décrits comme des variations de cet instrument fondamental.

# Chambres métriques de prise de vue aérienne

---



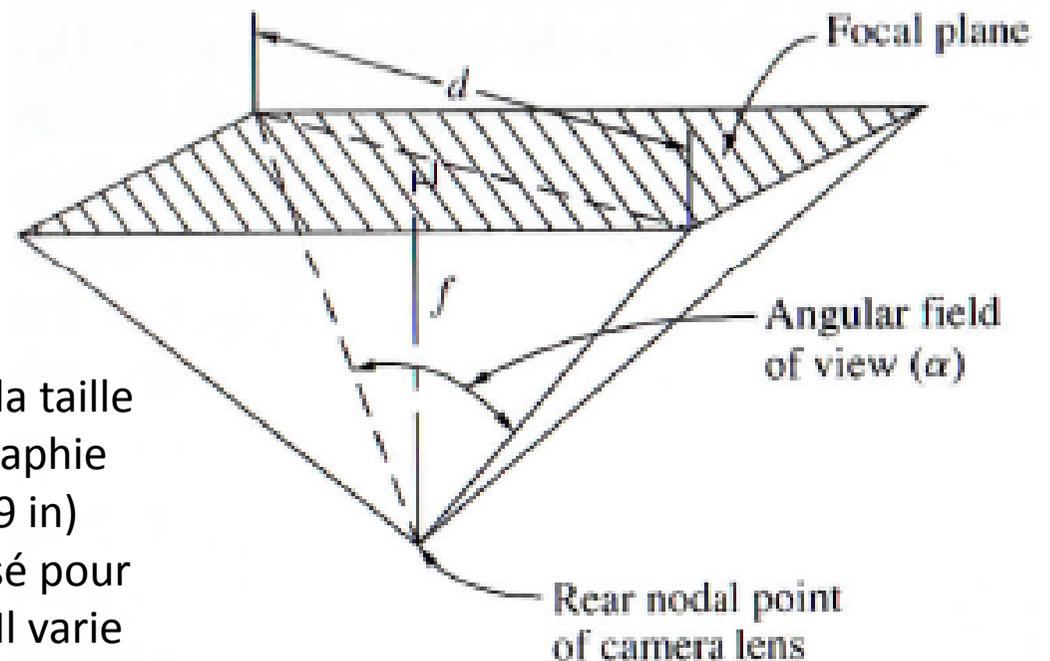
On appelle chambre métrique de prise de vues une chambre photographique dont la conception permet de connaître avec précision 3 éléments:

1. La position du point principale (centre de perspectif)
2. La distance principale (la distance focale)
3. Les distorsions de l'ensemble objectifs-corps pour des causes d'origine mécanique et optique

# Chambres métriques de prise de vue aérienne



Les caméras à cadre (frame camera) à lentilles simple sont de loin les dispositifs les plus courantes en usage aujourd'hui. Ils sont utilisés presque exclusivement dans l'obtention de photographies à des fins de cartographie, car ils fournissent des images de plus haute qualité géométrique. Avec un appareil à cadre à objectif simple, la lentille est maintenue fixe par rapport au plan focal. Le film est généralement fixé en position pendant l'exposition. Le format entier est exposé simultanément avec un seul clic de l'obturateur.



**$f$ :** la distance focale

**$d$ :** est la diagonale du format de l'image. (la taille du format la plus courante pour la cartographie aérienne est de 230 mm x 230mm (9 in x 9 in))

**L'angle  $\alpha$ :** est l'angle total de lumière utilisé pour former l'image; c'est aussi l'angle de vue. Il varie selon la distance focale

# Chambres métriques de prise de vue aérienne

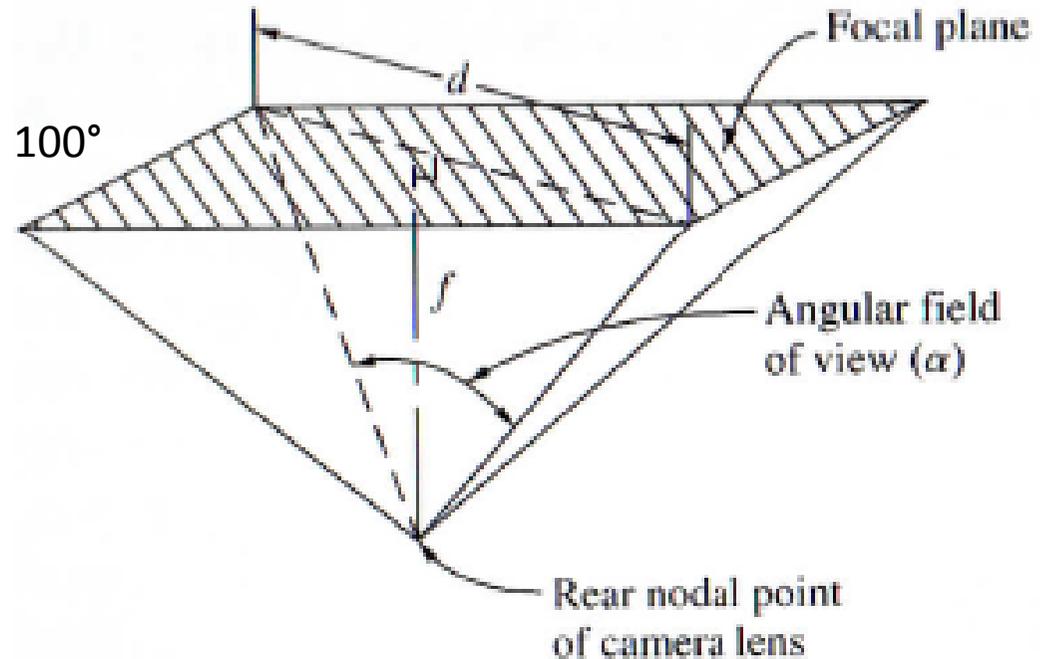


On distingue 04 classes de photographie aérienne selon l'angle de vue:

- Angle normal  $\rightarrow$  jusqu'à  $75^\circ$
- Grande angulaire  $\rightarrow$  de  $75^\circ$  à  $100^\circ$
- Super grande angulaire  $\rightarrow$  supérieur à  $100^\circ$
- Grande focale  $\rightarrow$  moins de  $25^\circ$

## Exercice

Donnez l'expression de l'angle de vue  $\alpha$  en fonction de la distance focale et des dimension du cliché  $\ell$



# Chambres métriques de prise de vue aérienne



$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left( \frac{d}{2f} \right)$$

Les caméras à cadre (frame camera) à lentilles simple sont disponibles dans une variété de distances focales, et le choix dépend de la finalité de la photographie. Le plus commun en usage aujourd'hui sont:

152 mm (6 in) de distance focale et 230 mm (9 in) format carré,

89 mm (3 ½ in),

210 mm (8 ¼ in),

et 305 mm (12 in) focales avec des formats de 230 mm

## Exercice

Calculez pour chaque distance focale l'angle de vue  $\alpha$  et donnez la classe correspondante

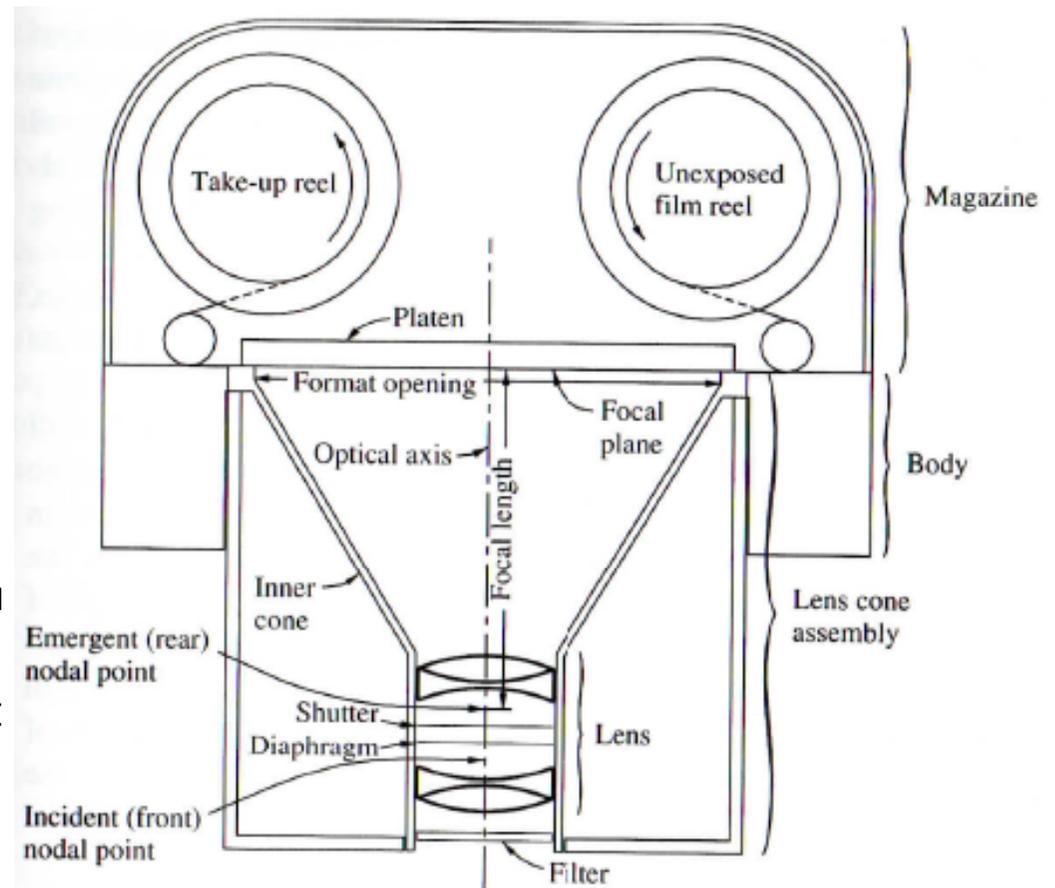
Distance focale	89 mm	152 mm	210 mm	305 mm
l'angle de vue $\alpha$	120° Super grande angulaire	90° Grande angulaire	70° Angle normal ou (moyen angle)	55° Angle normal
Applications	Moyennes et petites échelles	Application universelle	Orthophoto et cadastre	Carto. Urbaine à grande échelle et ortho urbaine

# Principaux composants d'une camera de prise de vue à cadre

La chambre métrique se distingue par leur solidité. L'axe optique est absolument perpendiculaire au plan de la plaque, le plan de la surface sensible étant placé aux mieux dans le volume de netteté.

La camera métrique se compose par :

- Un magasin de film indépendant du reste de la camera
- Une plaque de pression contre laquelle vient se plaquer le film maintenu par aspiration d'air
- L'assemblage cône de lentille contient un certain nombre de pièces et remplit plusieurs fonctions. Il contient l'obturateur, le diaphragme les lentilles de l'objectif

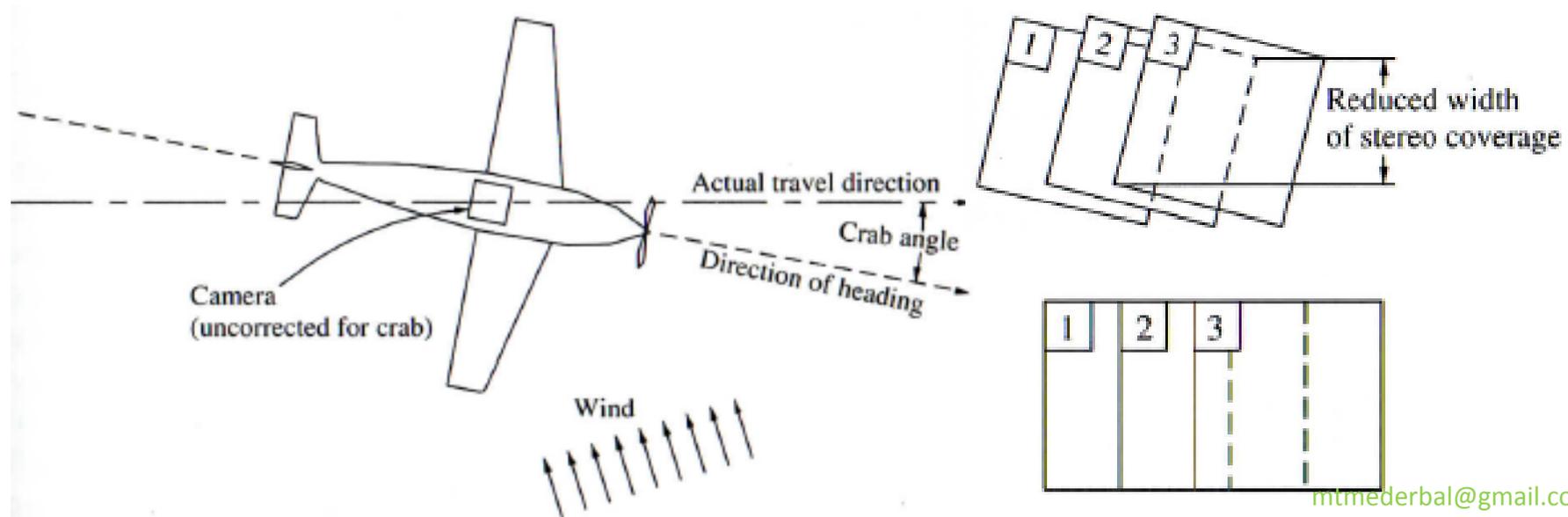


- Le filtre répond à trois objectifs: (1) il réduit l'effet de diffusion atmosphérique, (2) elle contribue à assurer une distribution uniforme de la lumière sur la totalité de la forme, et (3) il protège la lentille contre les dommages et la poussière.

# Supports de caméras



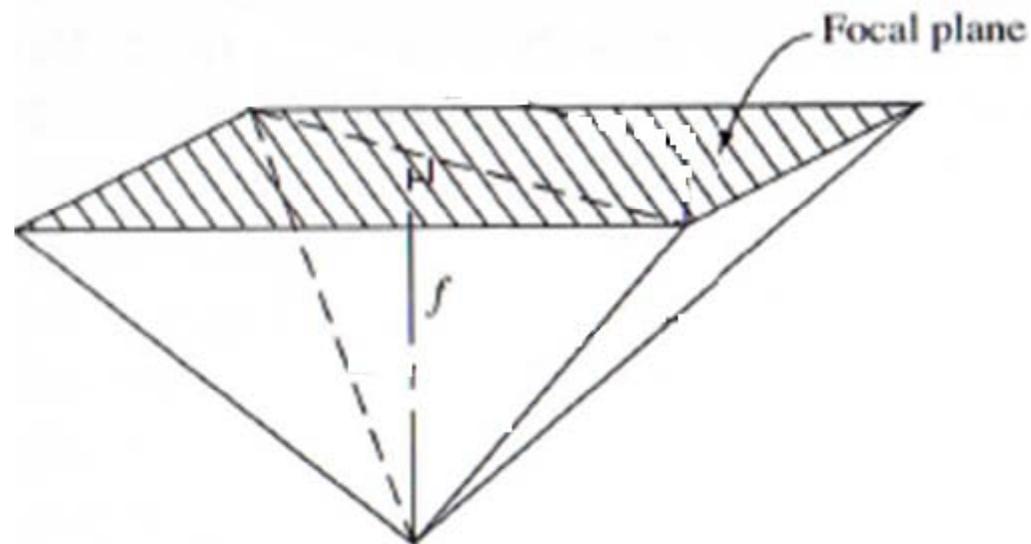
Le support de caméra est le mécanisme utilisé pour fixer la caméra à l'avion. Son but est de limiter l'alignement angulaire de la caméra de sorte que l'axe optique est vertical et le format est carrément aligné avec la direction de Voyage. Un montage minimale est équipé de dispositifs d'amortissement qui empêchent (ou au moins réduire) les vibrations de l'avion d'être transmis à la caméra, et aussi un mécanisme qui permet la rotation en azimut pour corriger crabe.



# Plan focal et Marques repères



Le plan focal d'une caméra de prise de vue aérienne est le plan dans lequel tous les rayons lumineux incidents viennent se concentrer. En photographie aérienne, les distances d'objets sont grands par rapport aux distances image. Les Caméras aériennes ont donc leur objectif fixé pour les distances d'objets infinis. Ceci est réalisé en réglant le plan focal le plus exactement possible à la distance focale de la lentille de la caméra. Le plan focal est défini par la surface supérieure du cadre de plan focal. C'est la surface sur laquelle l'émulsion d'un film repose lorsque l'exposition est effectuée.



# Plan focal et Marques repères

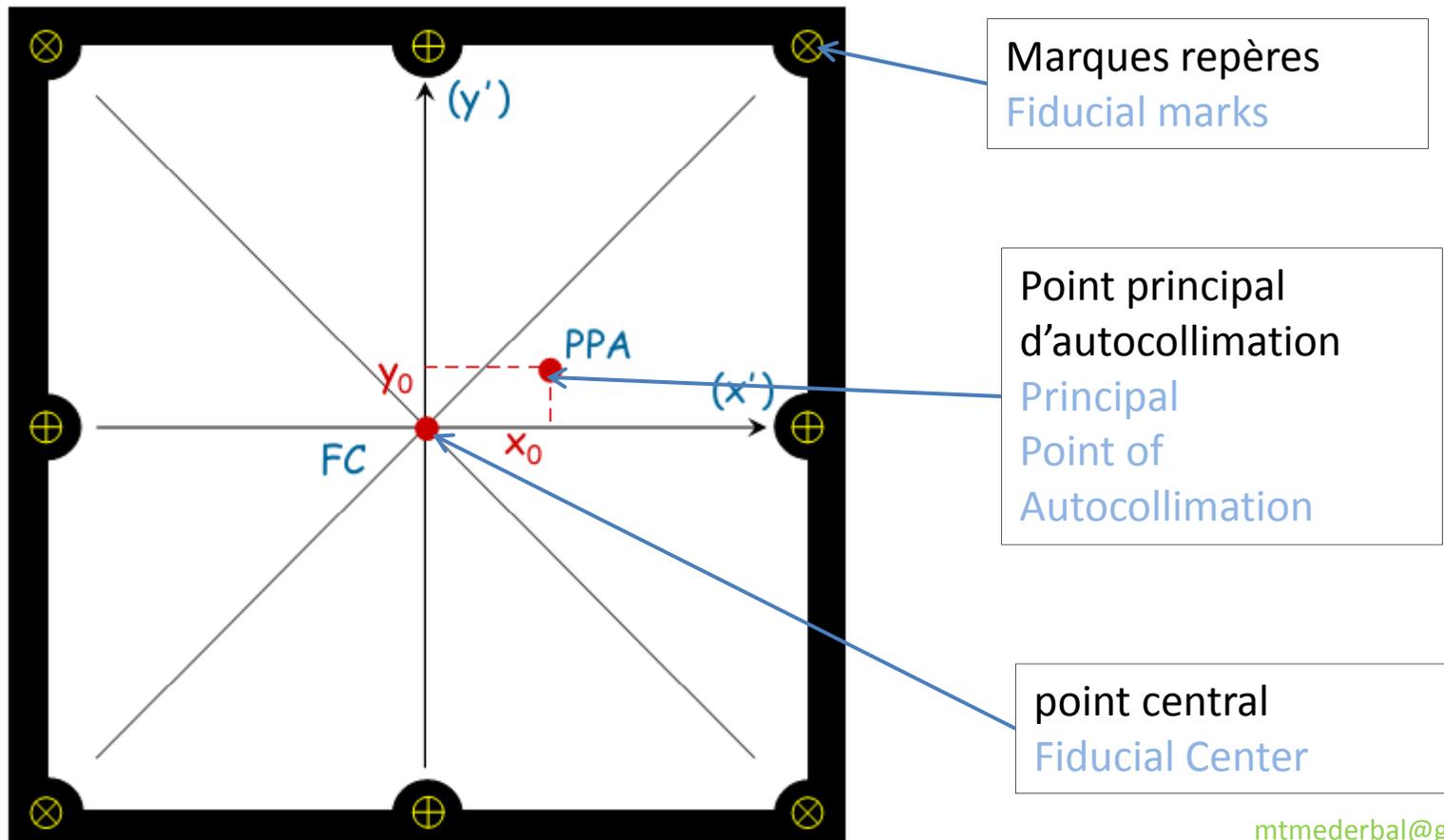


## Marques repères (Fiducial Marks)

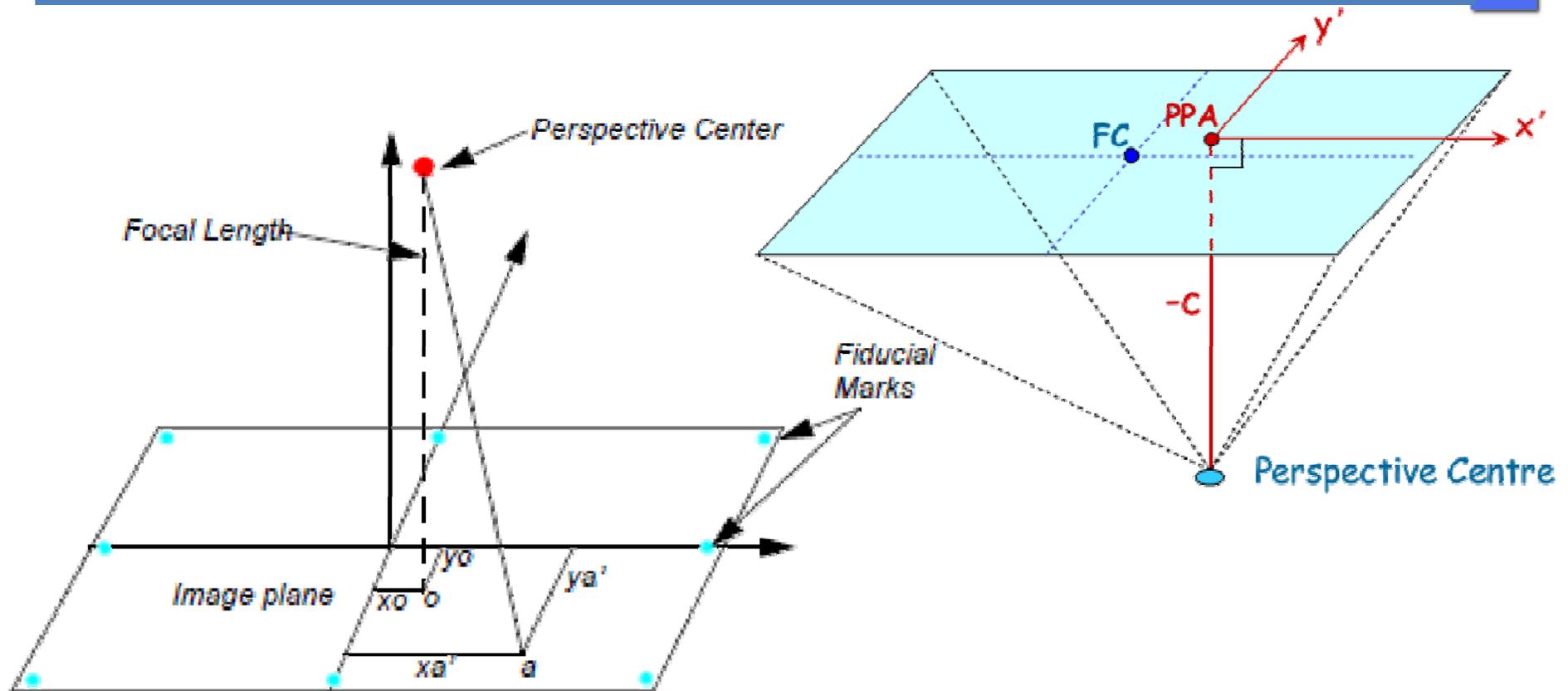
Marques calibrées fixes enregistrées durant l'exposition, elles définissent le système de coordonnées cliché.

## Le point Central (Fiducial Center)

L'intersection des diagonales qui lient les marques repères, ce point est très proche du point principale.



# Point principal d'autocollimation



Le point principale d'autocollimation d'une caméra étalonnée est la projection orthogonale du centre de perspective au plan focal .

Bien que c'est l'intention dans la fabrication des caméras de placer les marques repères afin que les lignes entre les paires opposées se croisent au point principal, il ya toujours un petit écart par rapport à cette condition idéale

# Caractéristiques des caméra numériques



Une image numérique est un tableau rectangulaire de pixels dans laquelle la luminosité d'une scène à chaque emplacement discret a été quantifiée. L'énergie électromagnétique réfléchie est enregistrée par des détecteurs à semi-conducteurs.

Un type courant de détecteur à l'état solide dans l'utilisation actuelle est le dispositif à couplage de charge (CCD). Bien qu'il existe un certain nombre de variantes de configurations de CCD, le principe de fonctionnement de base est le même. A un emplacement de pixel spécifié, l'élément CCD est exposé à l'énergie de la lumière incidente, et il s'accumule une charge électrique proportionnelle à l'intensité de la lumière incidente. La charge électrique est ensuite amplifiée et converti de l'analogique au format numérique. Un grand nombre de CCD peut être combinée sur une puce de silicium dans une matrice unidimensionnelle ou bidimensionnelle.



Capteur d'image CCD /  
1 Mpix, 1024 x 1024 pix



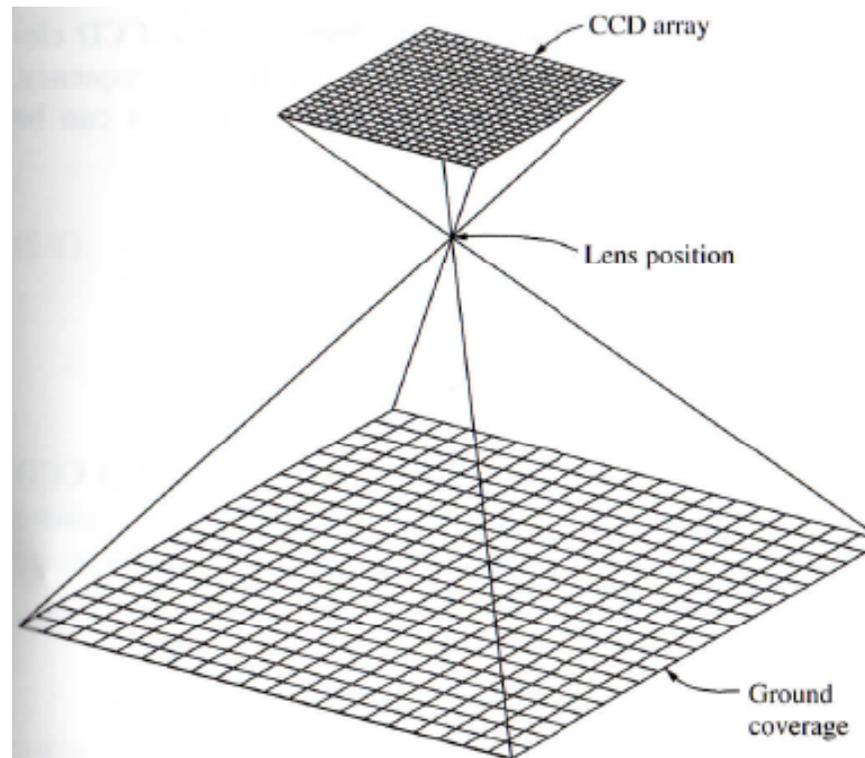
Capteur d'image CCD /  
linéaire 1024 pix,

# Caractéristiques des caméra numériques



## Caméra numériques matricielle (*Digital Frame Caméras*)

En remplacement ou complément des caméras analogiques les fabricants «historiques» de caméras photogrammétriques (essentiellement Wild et Zeiss) ont développé des caméras numériques en essayant de cloner les caméras analogiques en remplaçant le film par un dos numérique, par une matrice de CCD. C'est ce qui s'est fait pratiquement systématiquement avec les appareils photos de poche. Le modèle géométrique est resté le même (projection conique)

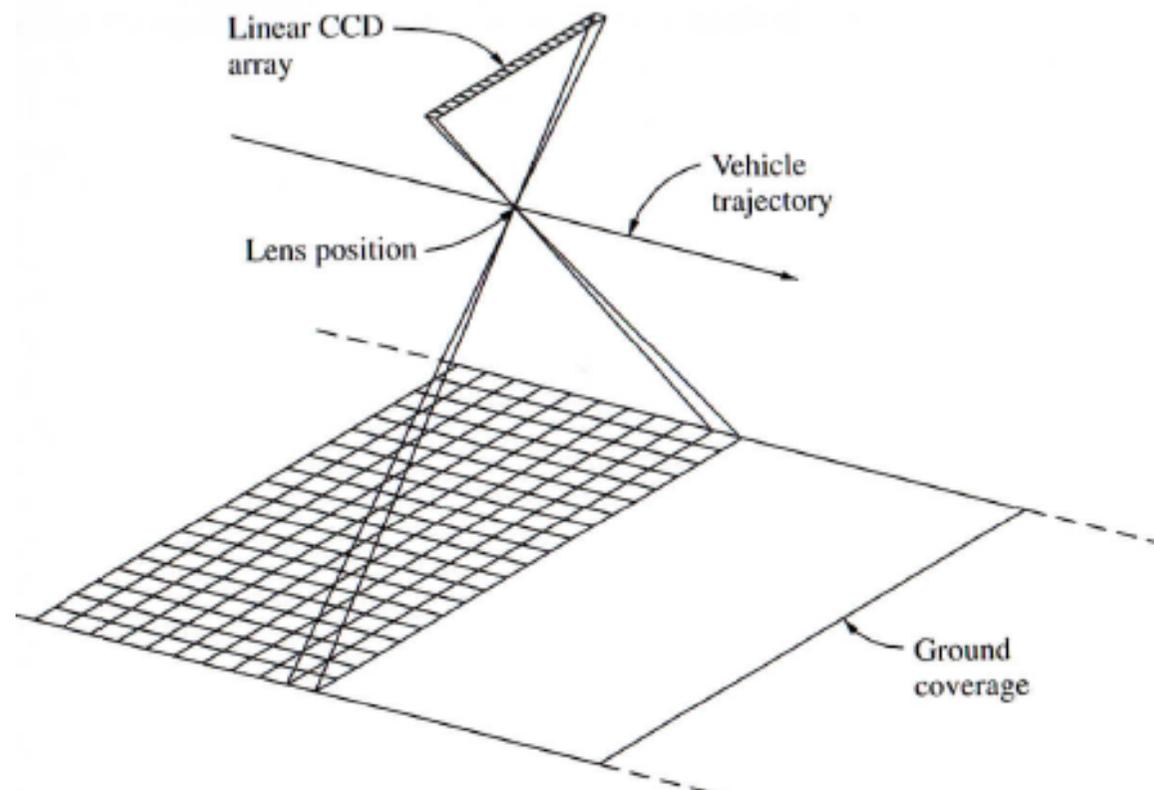


# Caractéristiques des caméra numériques



## Caméra numériques à barrettes CCD « *push-broom* » (*Linear Array Sensors*)

C'est un capteur « *push-broom* », littéralement un « *balais* ». Cela signifie simplement que le capteur balaye la surface longitudinalement et en continu. Leur caractéristique, est l'utilisation de **barrettes de CCD**, par opposition aux matrices de CCD.

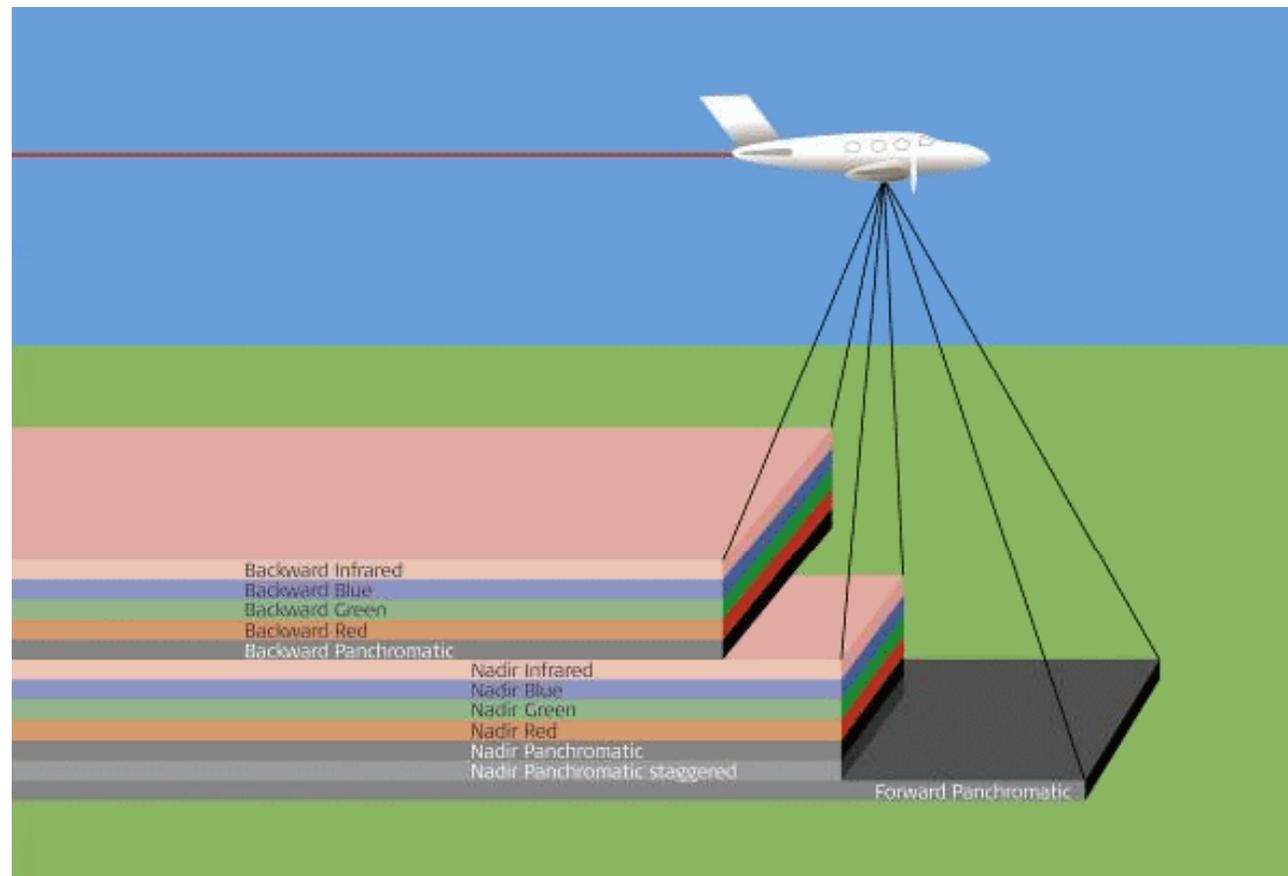


# Caractéristiques des caméra numériques



## Caméra numériques à barrettes CCD « *push-broom* » (*Linear Array Sensors*)

Les barrettes de CCD permettent de scanner toute la largeur de la scène. De plus, la combinaison de plusieurs barrettes (au minimum deux) permet de satisfaire la condition essentielle de la photogrammétrie.

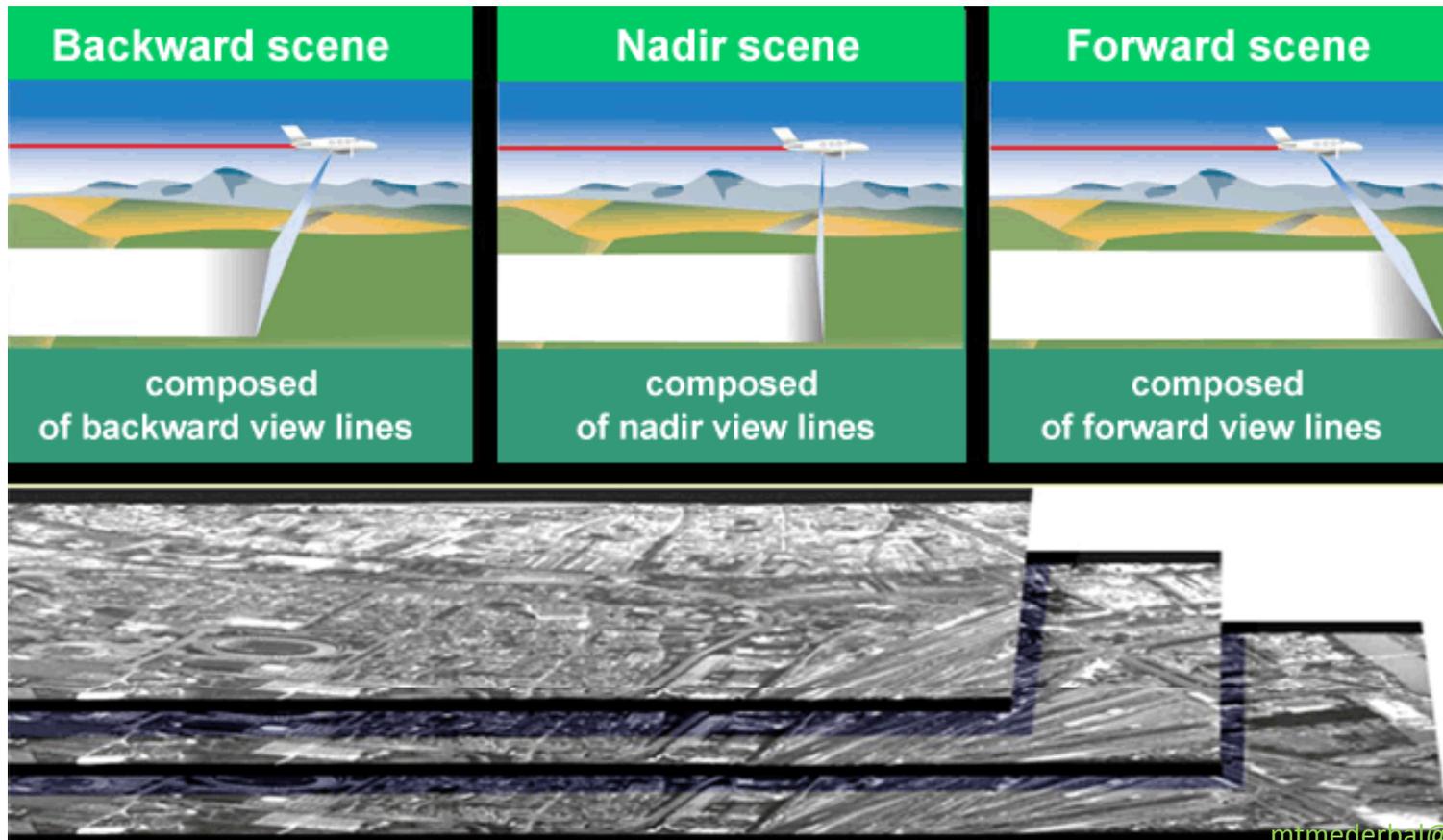


# Caractéristiques des caméra numériques



## Caméra numériques à barrettes CCD « *push-broom* » (*Linear Array Sensors*)

Les barrettes de CCD permettent de scanner toute la largeur de la scène. De plus, la combinaison de plusieurs barrettes (au minimum deux) permet de satisfaire la condition essentielle de la photogrammétrie.



# Caractéristiques des caméra numériques



## Caméra numériques à barrettes CCD « *push-broom* » (*Linear Array Sensors*)

### Exercice

Un satellite contenant un capteur à barrettes CCD (placé verticalement) se déplace à une vitesse de  $7300 \text{ m / s}$  par rapport à la surface de la terre. Si la taille des pixels individuels de l'image est de  $10,0 \text{ m}$  au sol, à quel fréquence (en hertz) les détecteurs doivent lire de manière à pour produire l'image?

# Exemple de camera de PDV



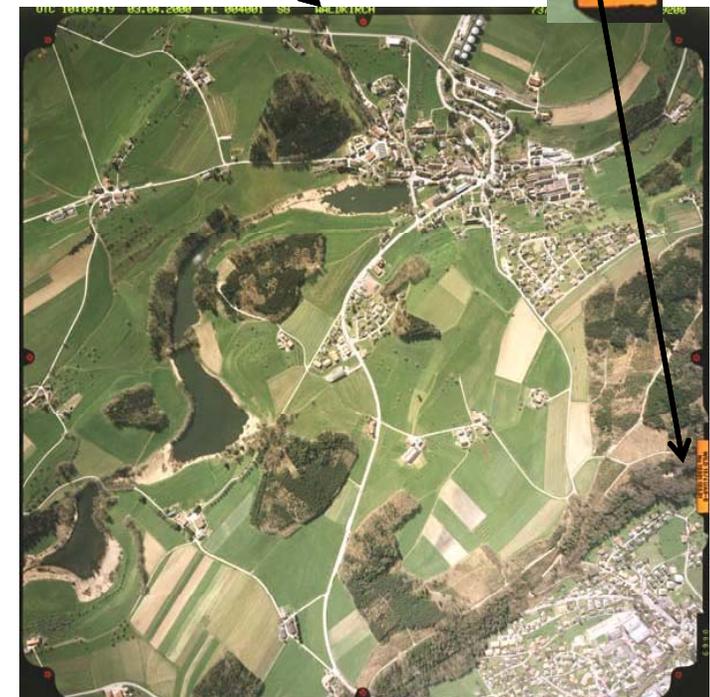
## Caméras analogiques

une caméra Leica RC30 qui s'est vendue dès 1993 pendant 10 ans à plus de 400 exemplaires.

On reconnaît le système d'entraînement, les cassettes (une avec le film vierge et une avec le film exposé), la plateforme gyroscopique stabilisatrice et l'objectif qui apparaît en dessous, ainsi que la poignée du filtre. Le périscopie sur la droite est avantageusement complété (mais pas remplacé) par un système de navigation et de contrôle de la caméra par GPS.



23 x 23 cm  
100 lp/mm (lignes par mm)  $\approx$  pixels/mm  
8 marques fiduciales (*fiducials*)



# Exemple de camera de PDV



## Caméras numériques « moyen format »

couramment appelées « 4k x 4k » en raison de la taille de la matrice CCD généralement combiné avec des capteurs comme le LiDAR.



4092 x 4079 pixels  
1 pixel = 9  $\mu$ m  
(3.6 x 3.6 cm)  
pas de marques fiduciaires



« La DSS (*Digital Sensor System* ou système de capteur numérique) est un système numérique aéroporté de prise de vue prêt à l'emploi, directement géoréférencé et de moyen format.

<http://www.applanix.com/solutions/airborne/dss.html>

# Exemple de camera de PDV



## Caméras numériques « grand format »

ADS est l'acronyme pour *Airborne Digital Sensor*. il n'y a plus de chambre et elle est remplacée par un plan focal munis de CCD.



# Exemple de camera de PDV



## Caméras numériques « grand format »

ADS est l'acronyme pour *Airborne Digital Sensor*. il n'y a plus de chambre et elle est remplacée par un plan focal munis de CCD.



12000 x n pixels 1 pixel = 6.5  $\mu\text{m}$  (78 mm de large) pas de marques fiduciaires

# Exemple de camera de PDV



## Caméras numériques « grand format »

La DMC (*Digital Modular Camera*) de Zeiss-Intergraph est, comme son nom l'indique, une caméra modulaire. Elle est en fait un assemblage de huit caméras :

- 4 caméras haute-résolution panchromatique 7k x 4k
- 4 caméras multispectrale 3k x 2k

Elle se monte dans la plateforme gyroscopique T-AS, également utilisée pour la Zeiss RMK-Top.



# Exemple de camera de PDV



Caméras numériques « grand format »



Chapitre IV:  
**Principes de mesure sur image**



# Introduction

---



La solution de la plupart des problèmes de photogrammétrie nécessite généralement un certain type de mesure. Pour certains problèmes les mesures peuvent être simplement distances entre les points. Cependant, les coordonnées rectangulaires de points sont le type le plus commun de la mesure photographique, et ils sont utilisés directement dans de nombreuses équations de photogrammétrie. Les mesures sont généralement faites sur les éléments positifs imprimés sur papier, film, ou en verre, ou dans les images numériques manipulées sur ordinateur. Ils pourraient aussi être faites directement sur les négatifs;

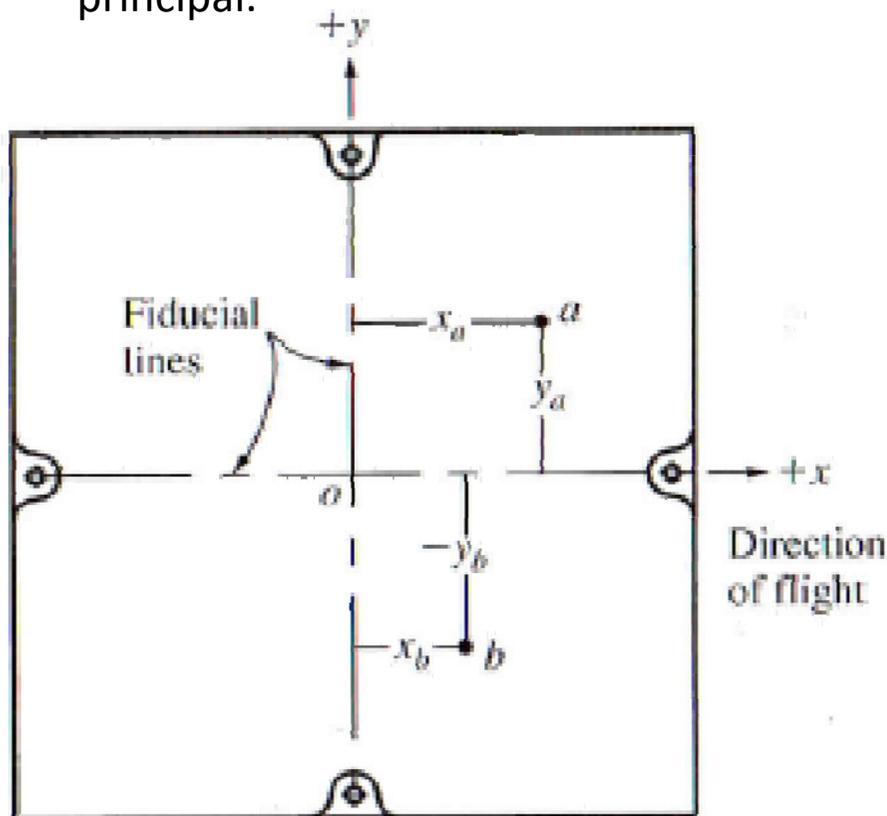
Le matériel utilisé pour la mesures sur photographie varie du moins coûteux, aux machines très précises et complexes qui fournissent sortie numérique compatible avec l'ordinateur. En raison de plusieurs effets, il y aura des erreurs systématiques associées à la mesures sur photographie.

# Systemes de mesures de coordonnees d'image



Pour cameras metriques avec marques repères, le systeme de reference utilise pour les coordonnees est le systeme d'axe rectangulaire formee en joignant les marques repères opposes avec des lignes droites. L'axe des x est oriente parallelement a la direction de vol, positif dans le sens de vol.

L'origine du systeme de coordonnees est l'intersection des lignes repères. Ce point est souvent appele le point principal indique, il est le plus proche possible du vraie point principal.



La position d'un point A sur une photographie, est donnee par sa forme rectangulaire coordonnees  $x_a$  et  $y_a$ , ou  $x_a$  est la distance perpendiculaire de l'axe y et  $y_a$  est la distance perpendiculaire de l'axe x.

Il est tres frequent pour les cameras aeriennes d'avoir huit repères installes dans les deux emplacements secondaires et de coin. le systeme de coordonnees de la photographie dans ce cas est toujours defini de la meme facon.

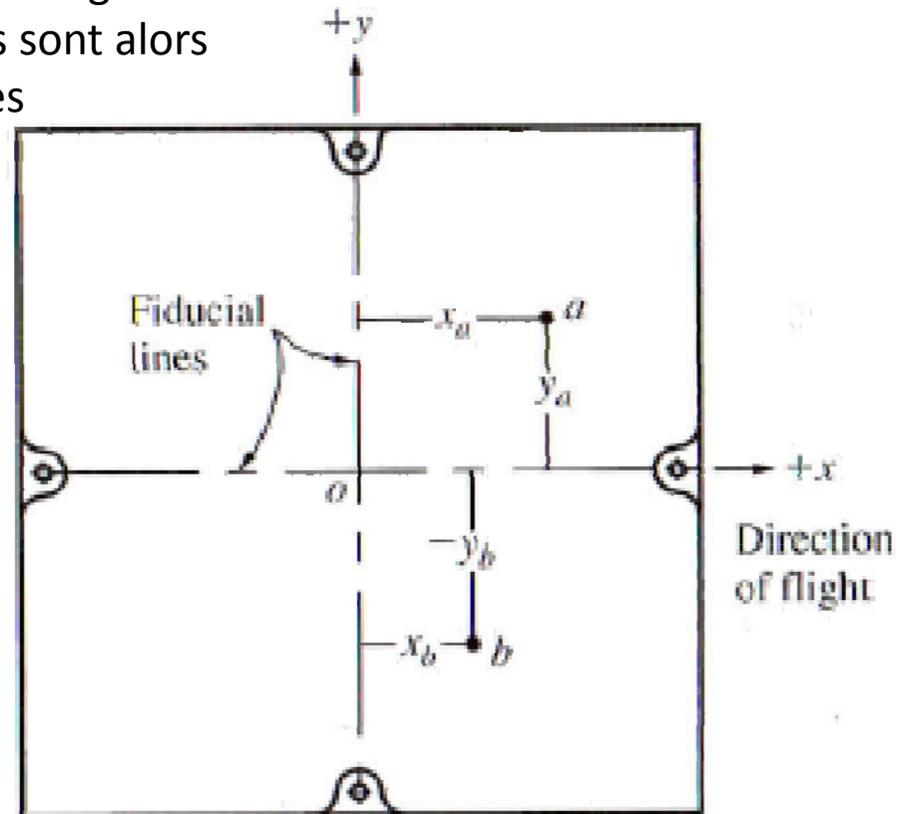
la distance  $ab$  sur la photographie est :

$$ab = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}$$

# Mesure des coordonnées photo



La procédure classique de mesure de coordonnées photo avec l'utilisation d'un Kutch consiste généralement en premier par le marquage du système d'axe des coordonnées de la photo. Cela peut être fait en prenant soin d'aligner une règle sur les marques repères et légèrement faire une ligne très fines. Les coordonnées rectangulaires sont alors obtenues par mesure directe des distances perpendiculaires de ces axes.



# Mesure des coordonnées photo



Il est possible d'obtenir des coordonnées photos en utilisant un kutch, mais sans dessiner des lignes repères. Dans cette procédure, appelée multilatération, les distances  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , et  $D_4$  peuvent être mesurées à partir des marques repères vers un point d'image. Les coordonnées des marques repères étant obtenus dans l'étalonnage de l'appareil photo, les coordonnées des points d'image peuvent ensuite être calculées en utilisant la trigonométrie.

## Application

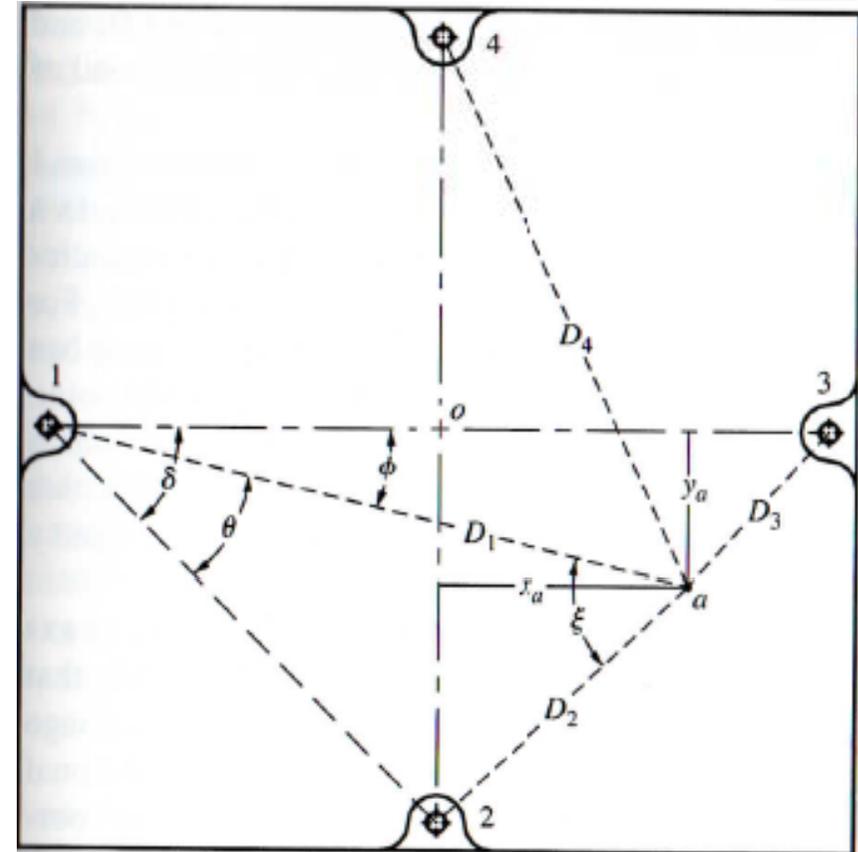
Supposons que les coordonnées calibré des marques repère 1 et 2 sont connus:

$$x_1 = -113,00\text{mm} \quad x_2 = 0,00\text{mm}$$

$$y_1 = 0,00\text{mm} \quad y_2 = -113,00\text{mm}$$

Calculer les coordonnées du point a si

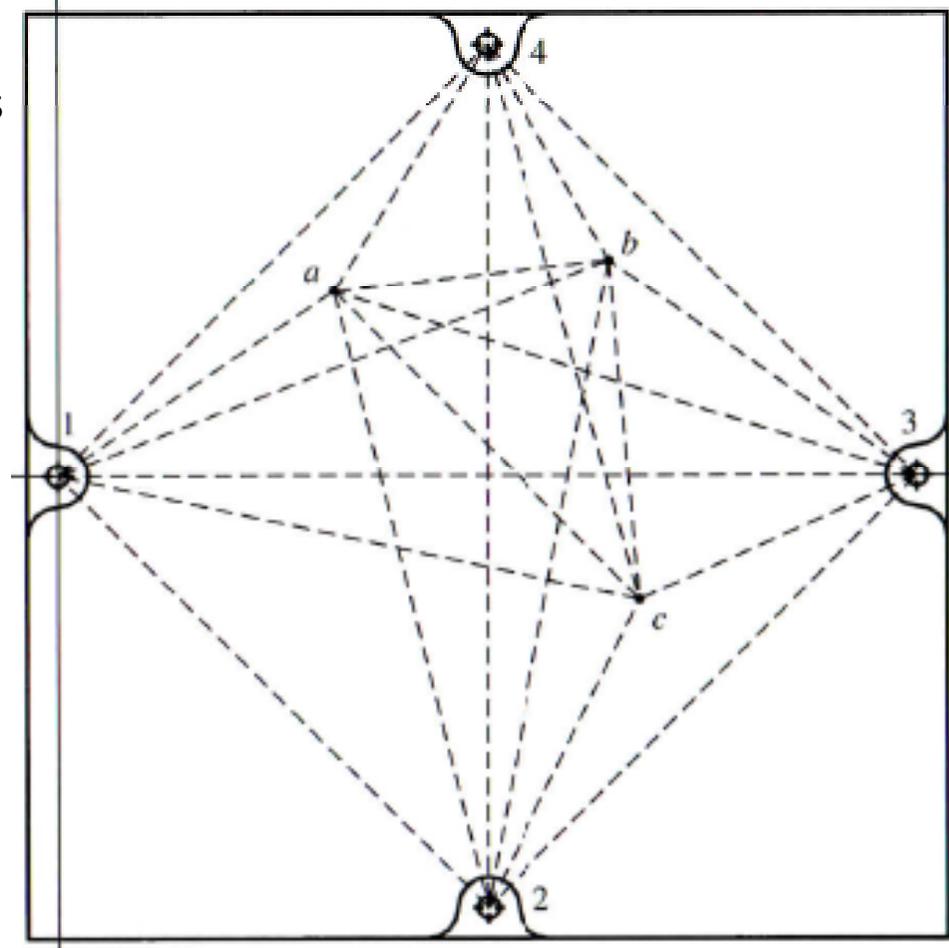
$$D_1 = 189,89\text{mm} \text{ et } D_2 = 100,47\text{mm}$$



# Mesure des coordonnées photo



Une extension du problème de trilatération est d'utiliser toutes les mesures de distance disponibles et de calculer les coordonnées du point d'image par moindres carrés. Dans une solution des moindres carrés, une équation mathématique est écrite pour chaque mesure de distance, en exprimant les distances en fonction des coordonnées inconnues du point. Par exemple, sur la Figure, quatre distances sont présentés, donc quatre équations indépendantes peuvent être écrites. Il ya, cependant, seulement deux inconnues, X et Y, associés au point. Il en résulte un système de quatre équations surdéterminé à deux inconnues qui a, en général, pas de solution unique. En utilisant les concepts de la méthode des moindres carrés, toutefois, ce système d'équations peut être résolu pour déterminer les valeurs les plus probables pour les coordonnées x et y.

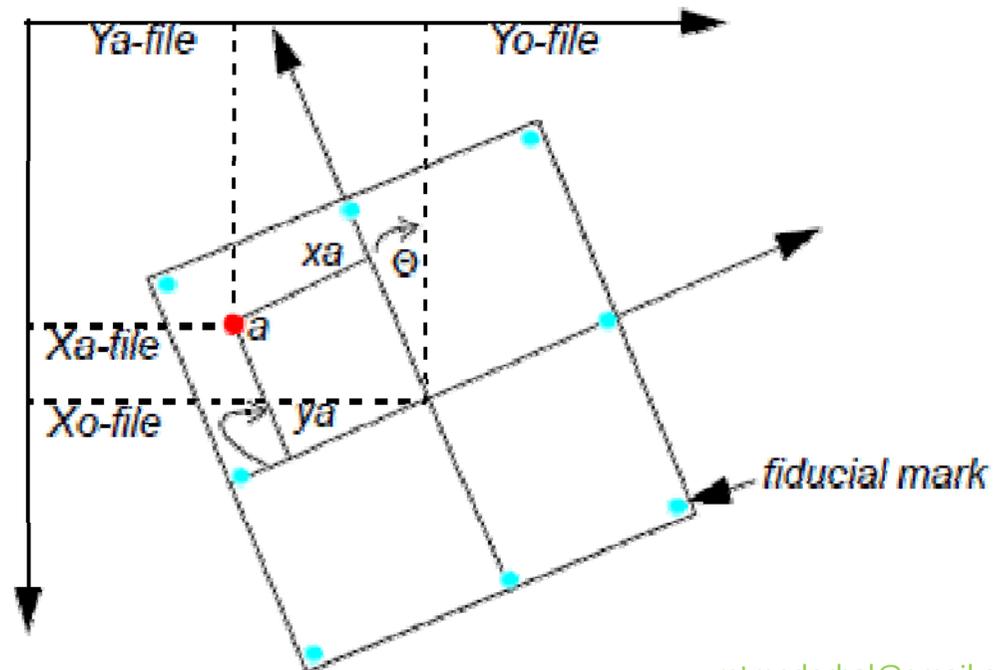


# Mesure des coordonnées photo



## Transformation 2D Affine

Dans une image scannée, le système de coordonnées image n'a pas encore été défini les coordonnées des marques repères sont référencées à un système de coordonnées pixel ou fichier. Le système de coordonnées pixel a une coordonnée X (colonne) et coordonnées Y (ligne). L'origine du système de coordonnées pixel est le coin supérieur gauche de l'image ayant une valeur de ligne et la colonne de 0 et 0, respectivement





## Transformation 2D Affine

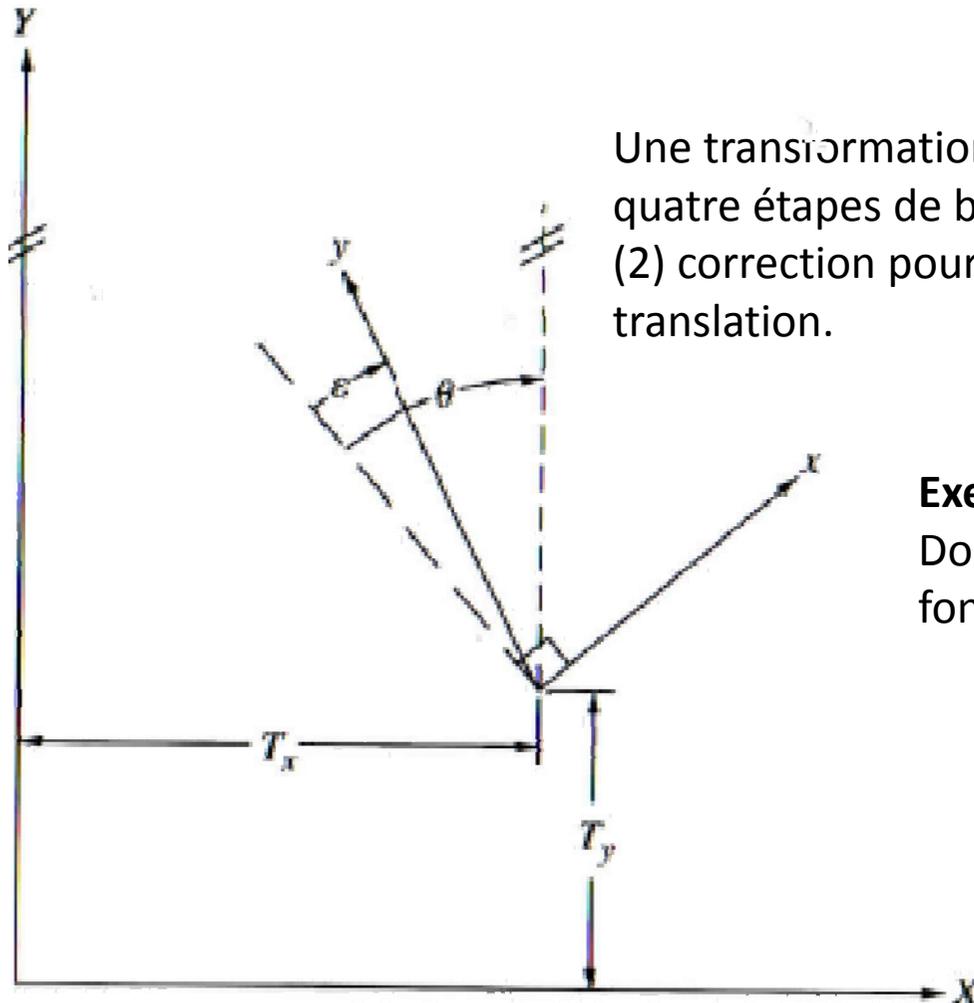
L'utilisation d'une transformation affine 2D, permet de définir la relation entre le pixel et le système de coordonnées image. Les équations de transformation 2D affines est utilisé pour transformer les mesures des coordonnées de pixels de l'image aux coordonnées photo:

$$x = a_1 + a_2X + a_3Y$$

$$y = b_1 + b_2X + b_3Y$$



## Transformation 2D Affine



Une transformation affine à deux dimensions se compose de quatre étapes de base: (1) le changement d'échelle en x et y, (2) correction pour défaut d'orthogonalité, (3) rotation, et (4) la translation.

### Exercice

Donnez l'expression de  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  en fonction de  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $\epsilon$  et  $\theta$

$$x = a_1 + a_2X + a_3Y$$

$$y = b_1 + b_2X + b_3Y$$



## Transformation 2D Affine

**Étape (1)** changement d'échelle

$$x' = f_x \cdot x$$

$$y' = f_y \cdot y$$

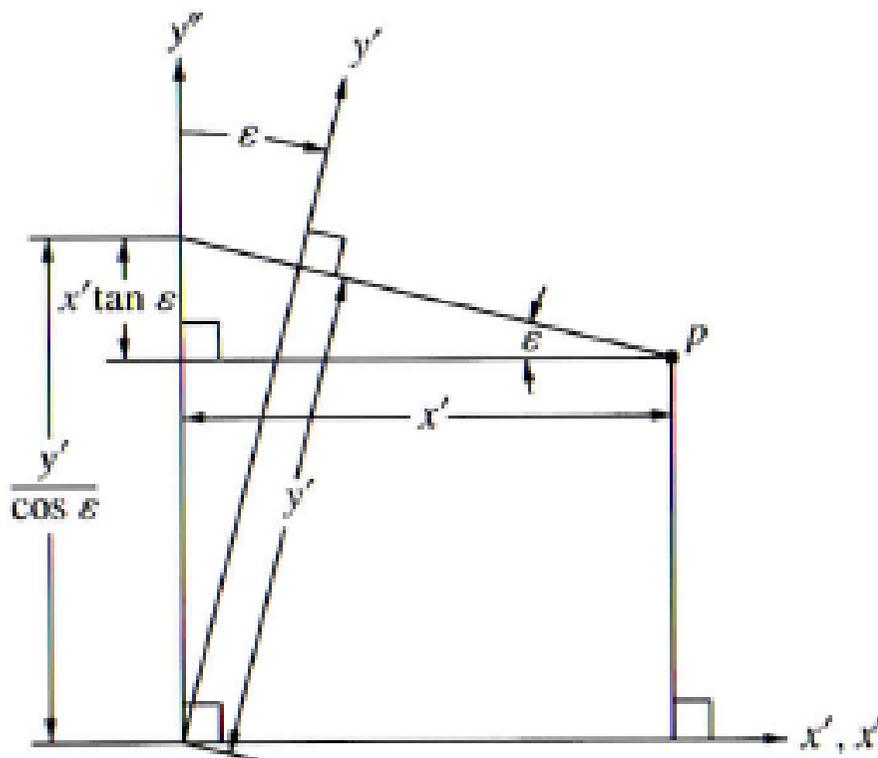


## Transformation 2D Affine

**Étape (2)** correction du défaut d'orthogonalité

$$x'' = x'$$

$$y'' = \frac{y'}{\cos \varepsilon} - x' \tan \varepsilon$$



# Mesure des coordonnées photo

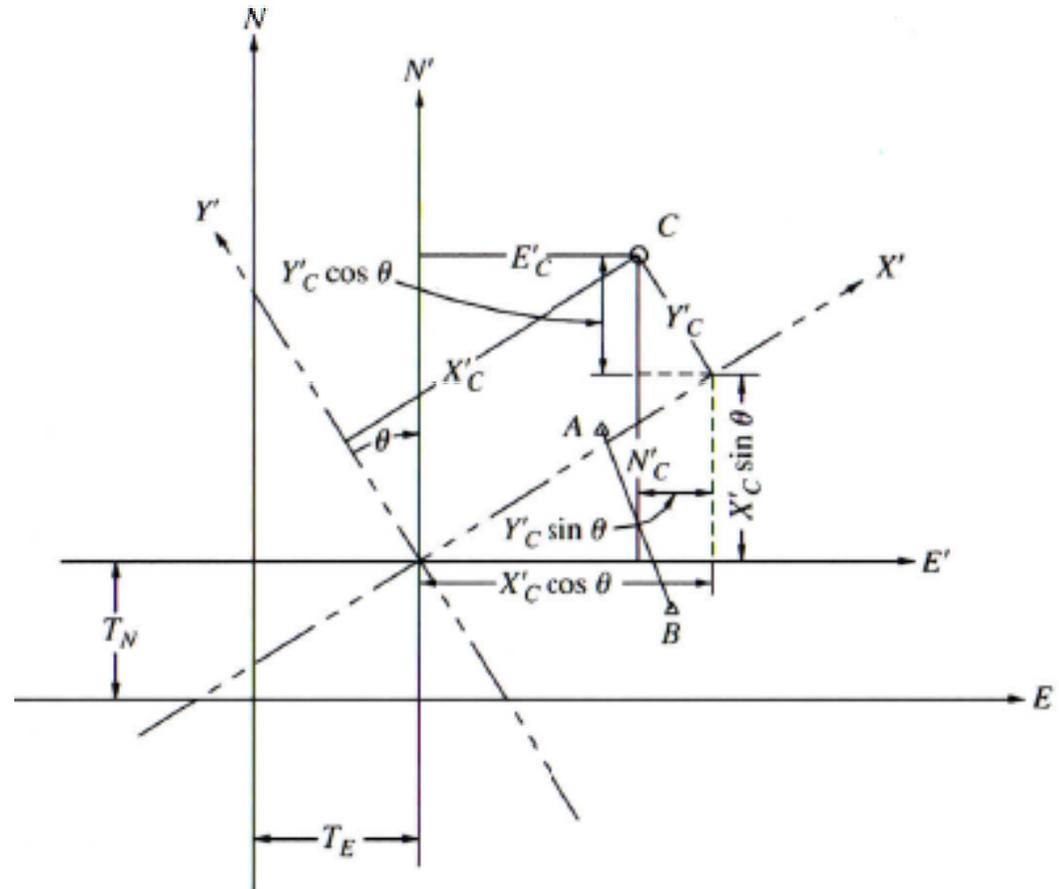


## Transformation 2D Affine

### Étape (3) Rotation des axes

$$X' = x'' \cos \theta - y'' \sin \theta$$

$$Y' = x'' \sin \theta + y'' \cos \theta$$



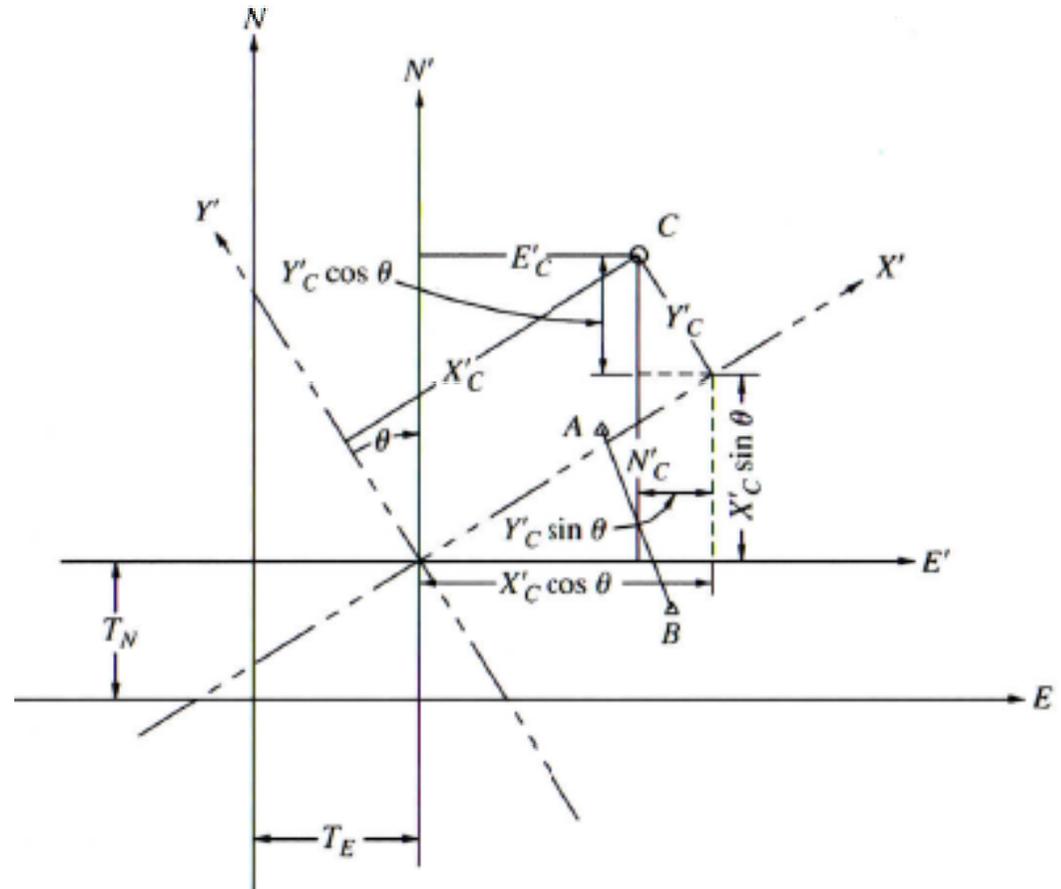


## Transformation 2D Affine

### Étape (3) Translation

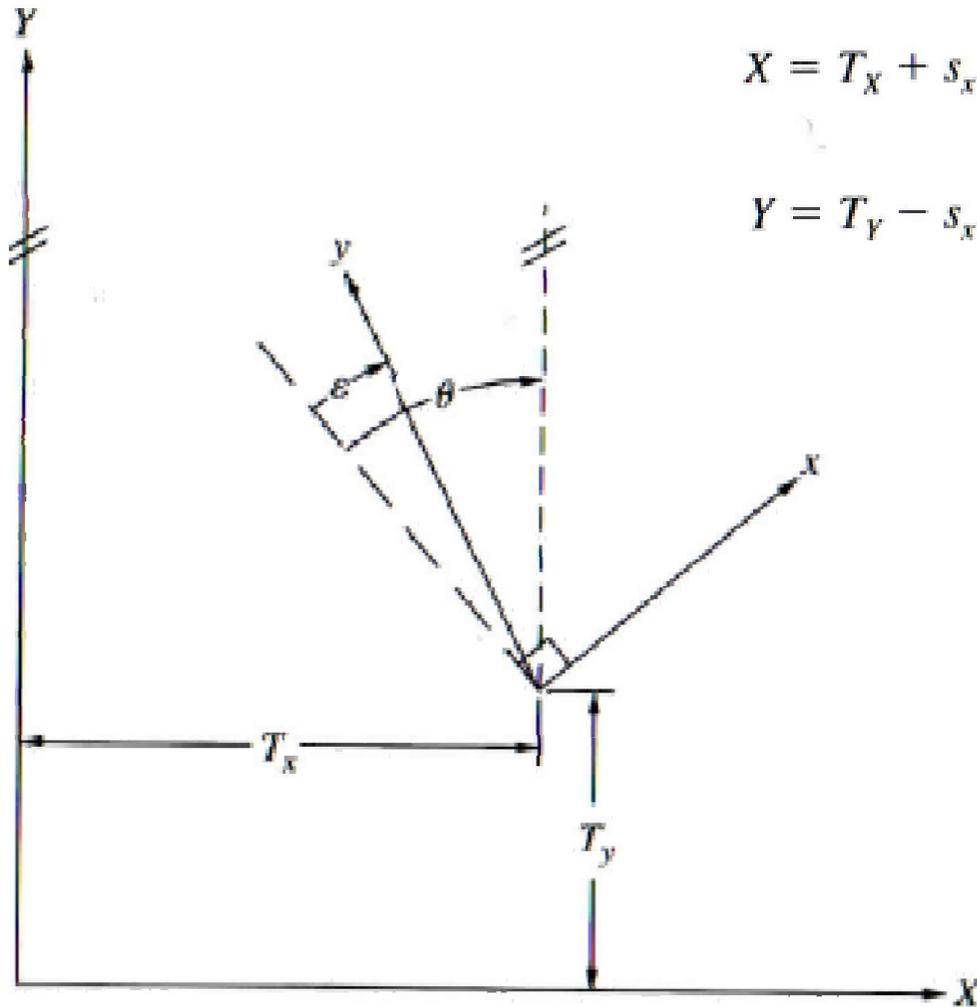
$$X = X' + T_X$$

$$Y = Y' + T_Y$$





## Transformation 2D Affine



$$X = T_x + s_x x \frac{\cos(\varepsilon - \theta)}{\cos \varepsilon} - s_y y \frac{\sin \theta}{\cos \varepsilon}$$

$$Y = T_y - s_x x \frac{\sin(\varepsilon - \theta)}{\cos \varepsilon} + s_y y \frac{\cos \theta}{\cos \varepsilon}$$



## Transformation 2D conforme

La transformation de coordonnées 2D Conforme n'est qu'un cas spécial de la transformation 2D affine ,

- le facteurs d'échelle dans les directions x et y est le même
- Et les deux système d'axe sont orthogonaux

Une transformation conforme à deux dimensions se compose alors de trois étapes de base: (1) le changement d'échelle, (2) rotation, (3), et la translation.

### Application

On suppose que les coordonnées des points A, B et C sont données dans deux système 1 et 2 comme suit:

Point	Système 1		Système 2	
	x	y	X	Y
A	632,17	121,45	1100,64	1431,09
B	355,20	-642,07	1678,39	254,15
C	1304,81	596,37	?	?

Calculez les coordonnées de C dans le système 2

# Scanner photogrammétrique



- Résolution géométrique = taille de pixel au sol [**GSD pour *Ground Sampling Distance***]

Les scanners photogrammétriques de haute qualité devraient être capables de produire des images numériques avec des résolutions géométriques de 5 à 15  $\mu\text{m}$ . Cela correspond à peu près au seuil de résolution de photographies aériennes typiques dans des conditions réelles de vol

- Scannage → DPI dot per inch



## Application

- Calculez la résolution de scannage si on veut avoir des pixels de taille 60, 30, 15, 7.5 micron

# Correction des mesure des coordonnées photo

---



Les coordonnées photo contiennent des erreurs systématiques provenant de diverses sources, cependant. Les principales sources de ces erreurs sont

1. distorsions du Film dues au rétrécissement, l'expansion, et le manque de planéité
2. Les axes repères ne se coupe pas au point principal
3. distorsions de l'objectif
4. distorsions due à la réfraction atmosphérique
5. Distorsion du à la courbure terrestre

# Correction de la dilatation du film



La valeur nominale de rétrécissement ou de dilatation présent dans une photographie peut être déterminée en comparant les distances mesurée entre les marques repères avec leurs valeurs correspondantes déterminées lors de l'étalonnage de l'appareil photo (selon l'axe des X et l'axe des Y

$$x'_a = \left( \frac{x_c}{x_m} \right) x_a$$

$$y'_a = \left( \frac{y_c}{y_m} \right) y_a$$

$x'_a$  et  $y'_a$  sont les coordonnées corrigées du point a

$x_a$  et  $y_a$  sont les coordonnées mesurées du point a

$x_m$  et  $y_m$  les distances mesurées selon l'axe des x et l'axe des y

$x_c$  et  $y_c$  les distances correspondantes selon l'axe des x et l'axe des y

# Correction de la dilatation du film



## Application

Soit le tableau ci-après contenant les coordonnées mesuré et des marques repères d'une photo données:

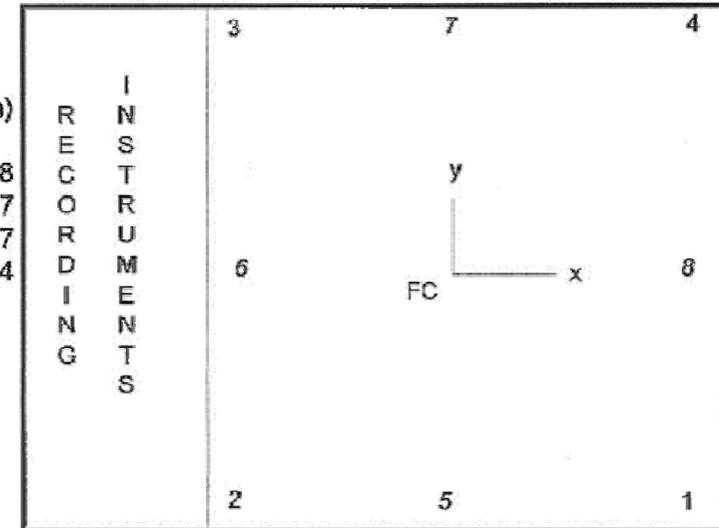
Fiducial marks, referred to central cross (FC)

	x (mm)	y (mm)		x (mm)	y (mm)
1	106.002	-106.004	5	0.003	-111.998
2	-105.992	-105.993	6	-111.992	0.007
3	-106.004	106.006	7	-0.010	111.997
4	105.995	105.996	8	111.998	-0.004

Les distances selon x et selon y mesurées sont données respectivement 223,604mm et 223,621mm

Calculer les coordonnées corrigées des points suivant mesurées sur la même photo:

Points	x	y
A	-102,6	95,2
B	-98,4	-87,8
C	16,3	-36,1
D	65,7	61,8
E	104,9	-73,5



as seen on focal plane frame



# Application



## Application

- 1- Supposons que  $x_1 = -111,948$  mm,  $y_1 = 0,010$  mm,  $x_2 = -0,004$  mm, et  $y_2 = -11,962$  mm. Calculer les coordonnées du point A s'il est distant des marques repères 1 et 2 respectivement de 65,237 et 143,907 mm.
- 2- Répétez l'exercice avec  $x_1 = -113,24$  mm,  $y_1 = 0,00$  mm,  $x_2 = 0,02$  mm, et  $y_2 = -113,23$  mm. Aussi D1, et D2 sont mesurées respectivement 165,42 et 56,72 mm,.
- 3- Répétez l'exercice 1 et 2 avec D1 et D2 sont mesurées à 127,0 et 97,6 mm, respectivement.

# Correction pour la distorsion de l'objectif

---



La distorsion de l'objectif provoque un déplacement de la position des images de leur emplacement idéal. Dans la photogrammétrie aérienne moderne, les distorsions de lentille des caméras sont généralement inférieures à  $5\mu\text{m}$  et ne sont appliquées que lors de la photogrammétrie analytique de précision.

Les équations mathématiques qui sont utilisées pour modéliser les distorsions de lentille sont généralement composées de deux éléments : la distorsion radiale symétrique et la distorsion décentrée.

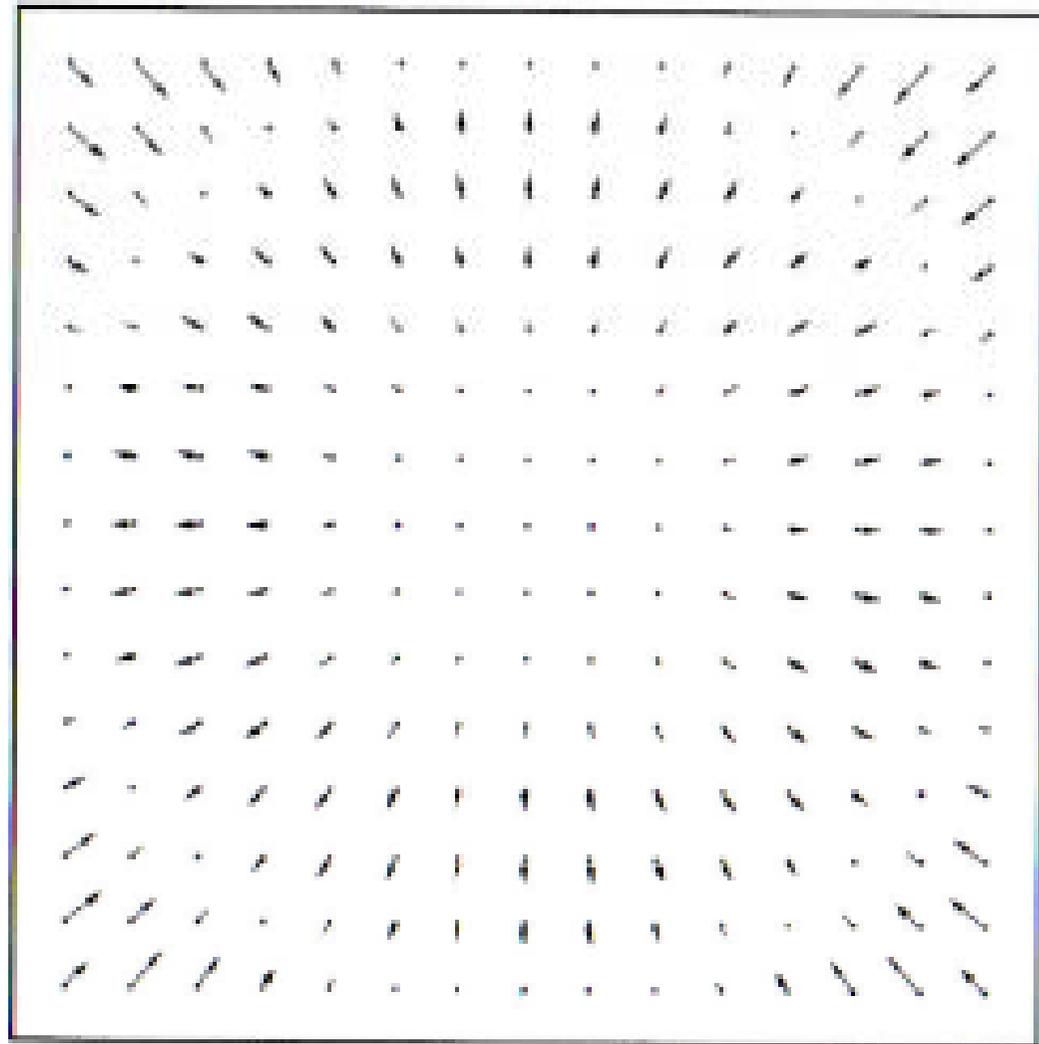
# Correction pour la distorsion de l'objectif



## la distorsion radiale symétrique de la lentille

est la composante symétrique de distorsion qui se produit le long des lignes radiales du point principal. Bien que la quantité peut être négligeable, ce type de distorsion est théoriquement toujours présent même si le système de lentille est parfaitement fabriqué .

la figure montre un motif de distorsion typique radiale symétrique de lentilles avec des magnitudes de distorsion grandement exagérées. Notez que la distorsion se produit dans une direction vers l'intérieur vers, ou vers l'extérieur depuis le centre de l'image.



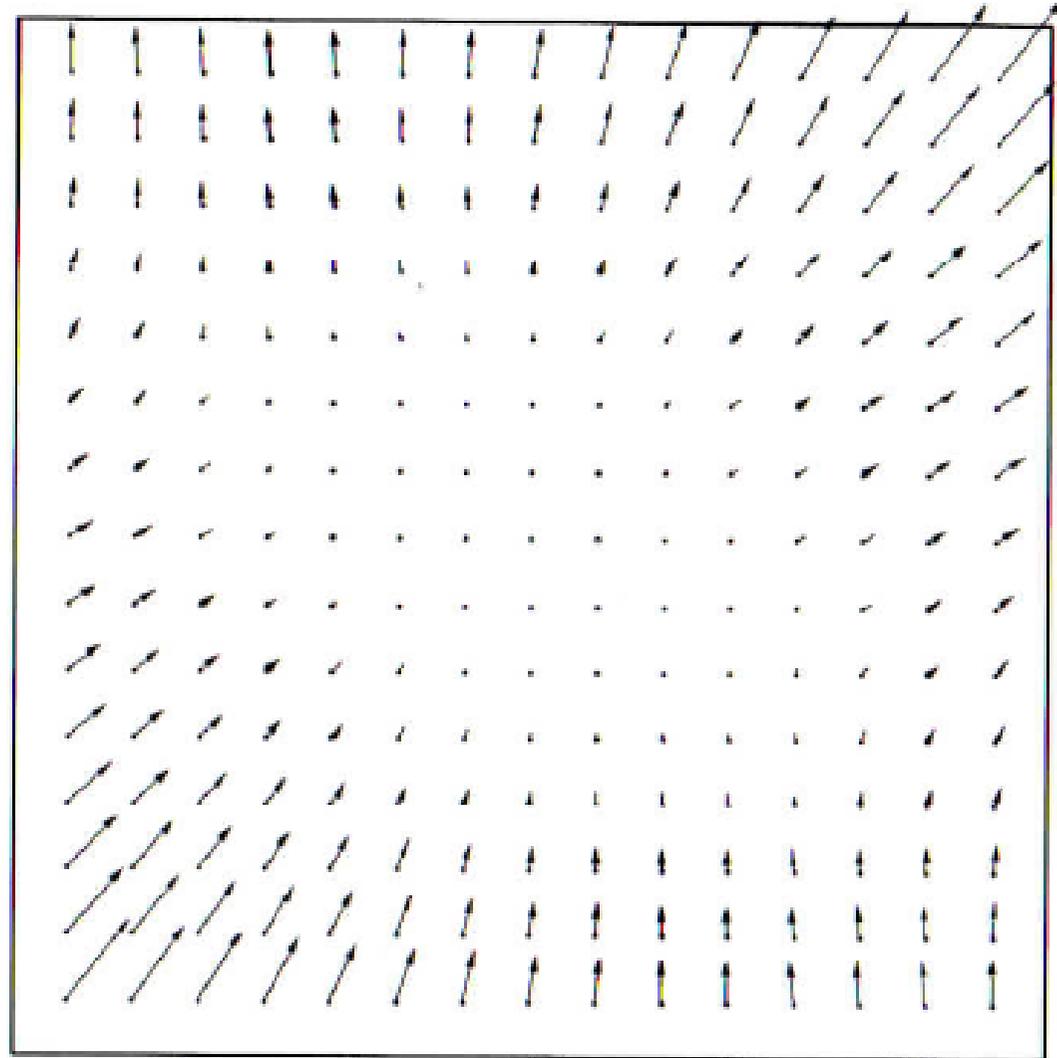
# Correction pour la distorsion de l'objectif



## la distorsion décentré de la lentille

C'est la distorsion de l'objectif qui reste après compensation pour la distorsion radiale symétrique . Distorsion décentré peut être décomposé en composantes tangentielle et distorsion radiale asymétrique.

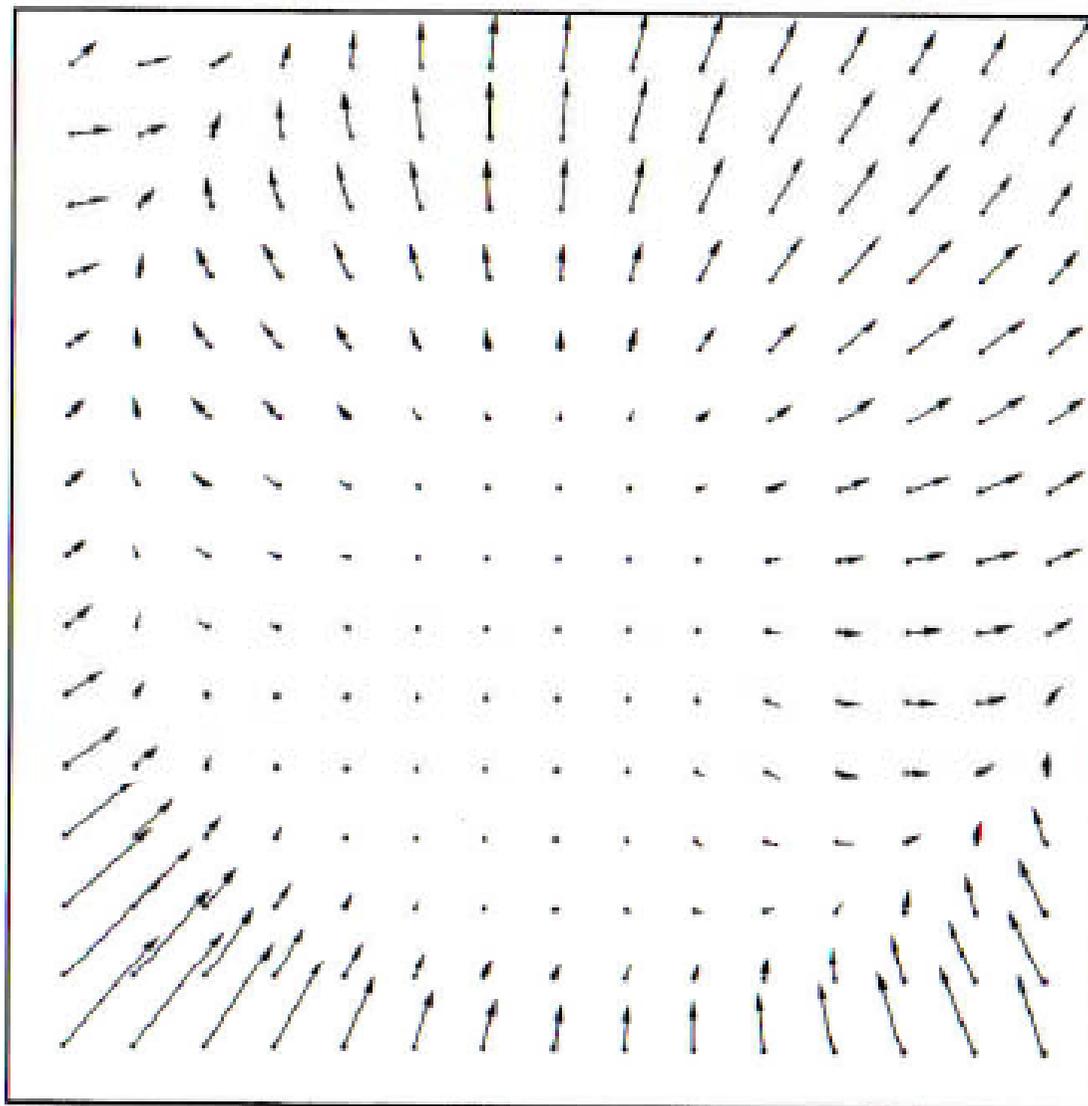
Ces déformations sont provoquées par des imperfections dans la fabrication et l'alignement du système de lentilles. La figure représente un motif typique de Distorsion décentré, de nouveau avec les grandeurs grandement exagérées.



# Correction pour la distorsion de l'objectif



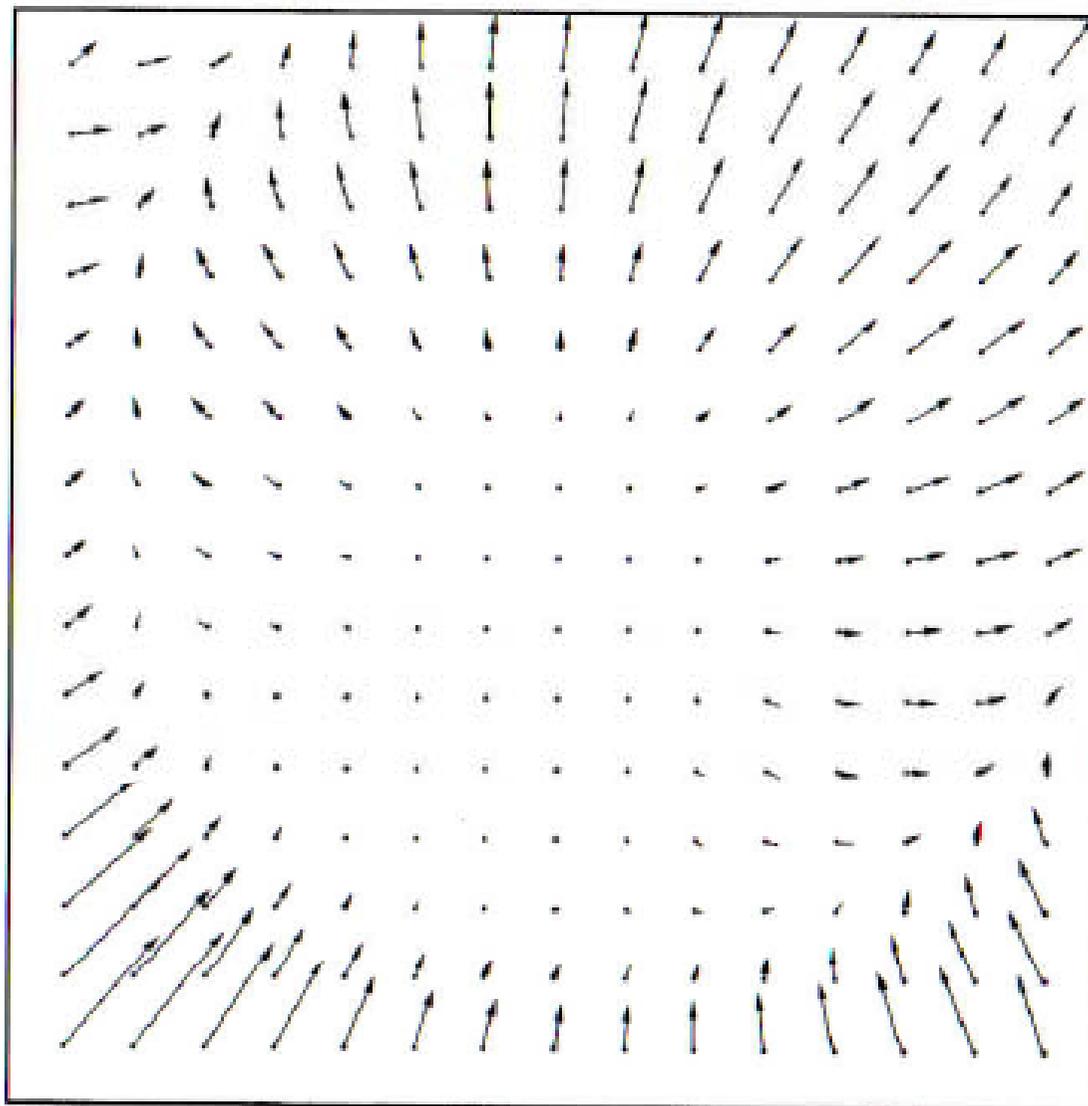
La figure montre un schéma typique de distorsion radiale symétrique combinée avec la distorsion décentré.



# Correction pour la distorsion de l'objectif



La figure montre un schéma typique de distorsion radiale symétrique combinée avec la distorsion décentré.



# Correction pour la distorsion de l'objectif



Dans la conception des caméras de prise de vue aérienne moderne la distorsion symétrique radiale de la lentille est du même ordre de grandeur que la distorsion décentré de et les rapports d'étalonnage de l'appareil ont été adaptés pour accueillir ce changement.

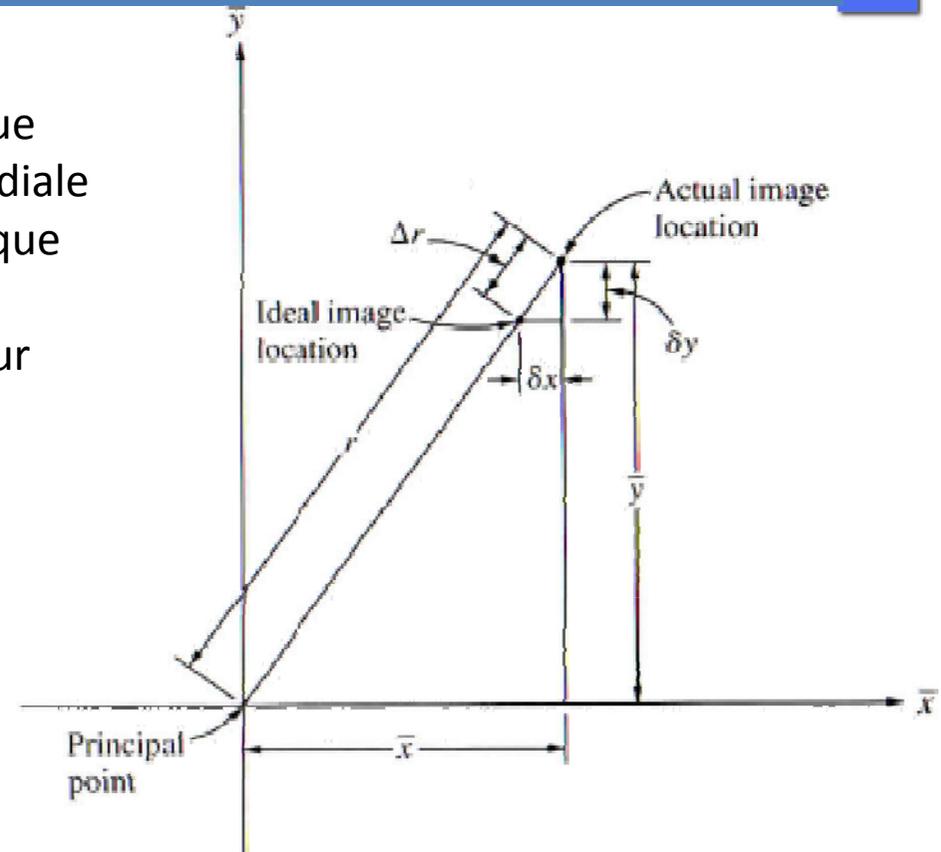
$$x_c = \bar{x} + \delta x + \Delta x$$

$$y_c = \bar{y} + \delta y + \Delta y$$

Tel que :  $\bar{x} = x - x_p$

$$\bar{y} = y - y_p$$

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$



$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\delta x}{\bar{x}} = \frac{\delta y}{\bar{y}}$$

$$\delta x = \bar{x} \frac{\Delta r}{r}$$

$$\delta y = \bar{y} \frac{\Delta r}{r}$$

# Correction pour la distorsion de l'objectif



le modèle mathématique utilisé dans la procédure d'étalonnage USGS, connu sous le nom Simultaneous Multi-camera Analytical Calibration (SMAC), Le rapport d'étalonnage de l'appareil photo USGS répertorie les coefficients du polynôme pour distorsion radiale symétrique de la lentille ( $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$ ), et la distorsion décentré ( $p_1, p_2, p_3, p_4$ ). Pour calculer les coordonnées  $(x_c, y_c)$  corrigé ces erreurs systématiques, les équations suivantes sont utilisées:

$$\delta x = \bar{x} (k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8)$$

$$\delta y = \bar{y} (k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8)$$

$$\Delta x = (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4) [p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x} \bar{y}]$$

$$\Delta y = (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4) [2 p_1 \bar{x} \bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2)]$$

$$x_c = \bar{x} + \delta x + \Delta x$$

$$y_c = \bar{y} + \delta y + \Delta y$$

# Correction pour la distorsion de l'objectif

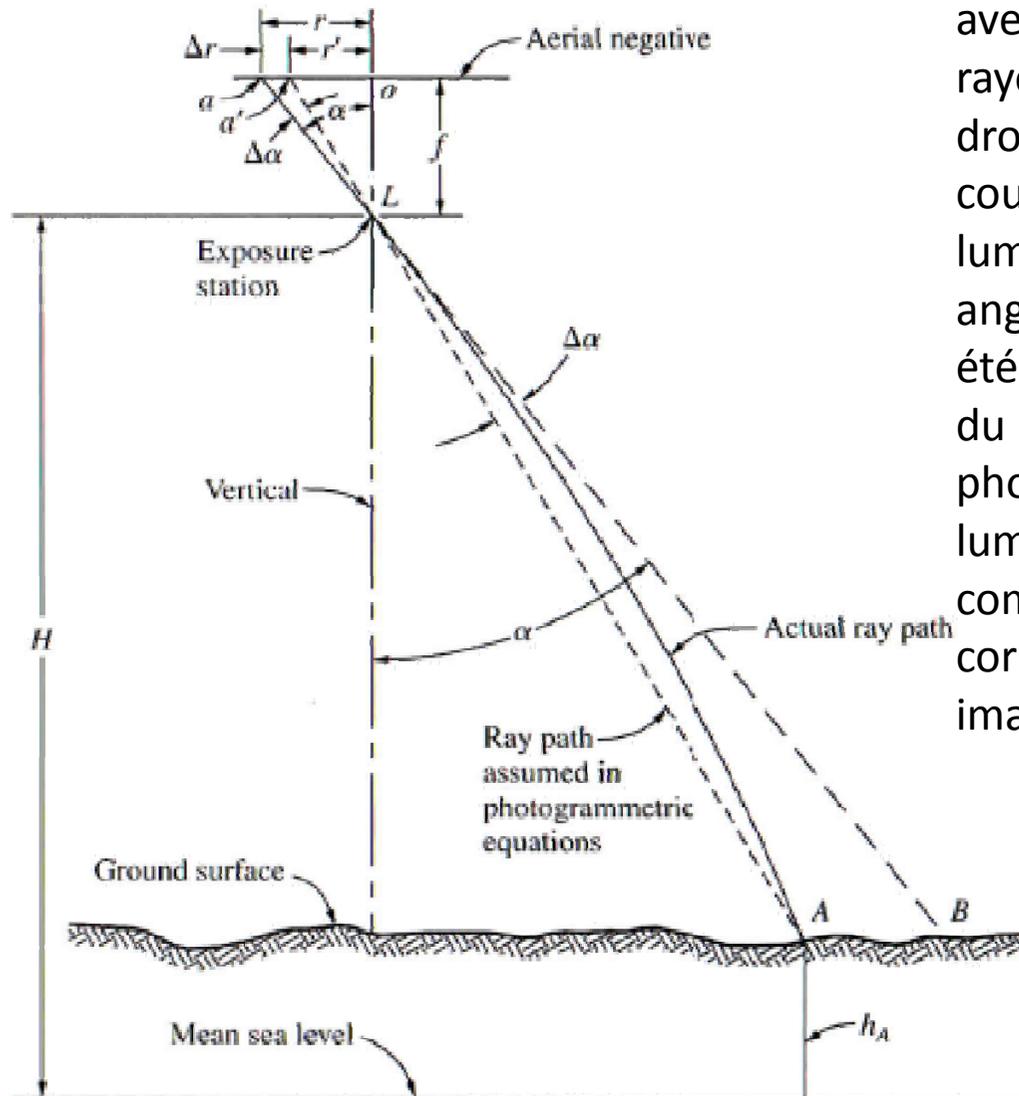


## Application

Les paramètres d'un rapport de calibration d'une caméra USGS sont donnés dans le tableau suivant. En utilisant ces valeurs d'étalonnage, calculer les coordonnées corrigées pour un point image ayant les coordonnées  $x = -47,018$  mm,  $y = 43,430$  mm par rapport aux axes fiduciaire.

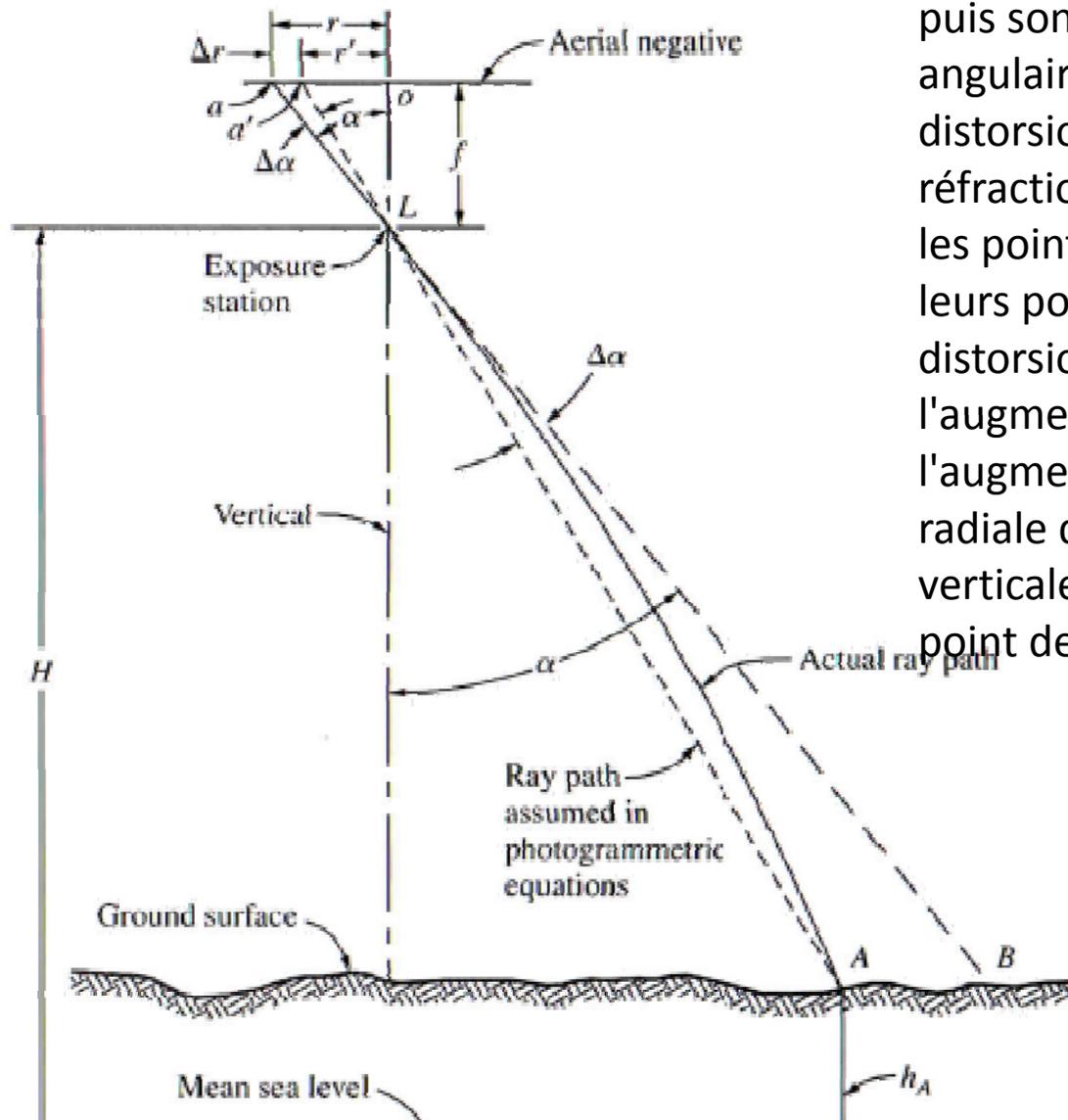
Symmetric radial distortion parameters		Decentering distortion parameters		Calibrated principal point	
$k_0$	$0.5493 \times 10^{-4}$	$p_1$	$-0.7953 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-1}$	$x_p$	0.010 mm
$k_1$	$-0.5984 \times 10^{-8} \text{ mm}^{-2}$	$p_2$	$0.1018 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$	$y_p$	-0.001 mm
$k_2$	$0.1053 \times 10^{-12} \text{ mm}^{-4}$	$p_3$	$0 \text{ mm}^{-2}$		
$k_3$	$0 \text{ mm}^{-6}$	$p_4$	$0 \text{ mm}^{-4}$		
$k_4$	$0 \text{ mm}^{-8}$				

# Correction de la réfraction atmosphérique



Il est bien connu que la densité (et donc l'indice de réfraction) de l'atmosphère diminue avec l'altitude. En raison de cette situation, les rayons lumineux ne se déplacent pas en ligne droite dans l'atmosphère, mais elles sont courbés, comme le montre la Fig. Le rayon lumineux entrant du point A de la figure fait un angle  $\alpha$  avec la verticale. Si la réfraction ont été ignorés, le rayon de lumière semble venir du point B plutôt que du point A. les équations photogrammétrie supposent que les rayons lumineux Voyage en voies droites, et pour compenser les chemins réfractés, les corrections sont appliquées aux coordonnées image.

# Correction de la réfraction atmosphérique



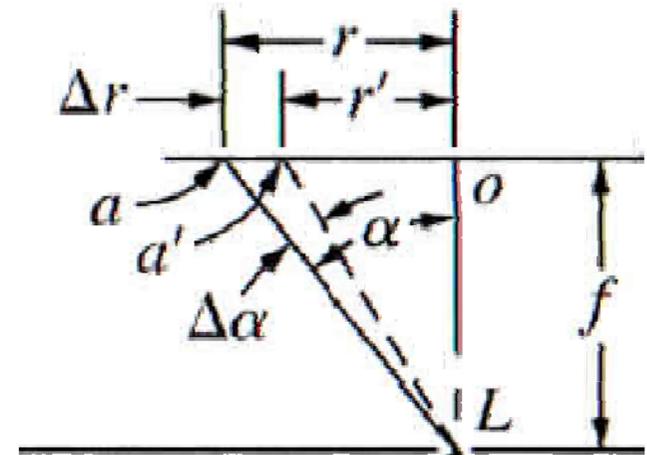
Dans la Fig., si un trajectoire rectiligne avait été suivi par le rayon lumineux du point d'objet A, puis son image aurait été à  $a'$ . La distorsion angulaire due à la réfraction est  $\Delta\alpha$ , et la distorsion linéaire sur la photo est  $\Delta r$ . La réfraction provoque un déplacement de tous les points d'image vers l'extérieur à partir de leurs positions correctes. La magnitude de la distorsion due à la réfraction augmente avec l'augmentation de la hauteur de vol et avec l'augmentation de l'angle  $\alpha$ . La distorsion radiale du point o (point principal d'une photo verticale) photographie du nadir est nulle au point de nadir.

# Correction de la réfraction atmosphérique



La relation qui exprime la distorsion angulaire  $\Delta\alpha$  en fonction de  $\alpha$  est

$$\Delta\alpha = K \tan \alpha$$



K est une valeur qui dépend de la hauteur de vol au dessus du niveau moyen de la mer et l'altitude du point de l'objet. Il existe plusieurs approches différentes pour calculer une valeur K, avec la plupart en supposant une atmosphère standard.

$$K = (7.4 \times 10^{-4}) (H - h) [1 - 0.02(2H - h)]$$

H est la hauteur de vol de la caméra au-dessus du niveau moyen de la mer en kilomètres  
h est l'altitude du point de l'objet au-dessus du niveau moyen de la mer en kilomètres.  
Les unités de K sont degrés.



# Correction de la réfraction atmosphérique



## Application

La caméra qui a pris la photographie avait une distance focale de 152,544 mm, la hauteur de vol dessus du niveau moyen de la mer (MSL) est 9410 m, et l'élévation moyenne du terrain était de 260 m MSL. Calculer les coordonnées de photo (pour le micromètre près) corrigées de la réfraction atmosphérique

Point	$x$ , mm	$y$ , mm
$a$	28.738	49.211
$b$	57.820	-93.705
$c$	-117.232	-102.794

# Application



## Application

- 1- Supposons que  $x_1 = -111,948$  mm,  $y_1 = 0,010$  mm,  $x_2 = -0,004$  mm, et  $y_2 = -11,962$  mm. Calculer les coordonnées du point A s'il est distant des marques repères 1 et 2 respectivement de 65,237 et 143,907 mm.
- 2- Répétez l'exercice avec  $x_1 = -113,24$  mm,  $y_1 = 0,00$  mm,  $x_2 = 0,02$  mm, et  $y_2 = -113,23$  mm. Aussi D1, et D2 sont mesurées respectivement 165,42 et 56,72 mm,.
- 3- Répétez l'exercice 1 et 2 avec D1 et D2 sont mesurées à 127,0 et 97,6 mm, respectivement.

Chapitre V:  
**Photographie aérienne à axe  
vertical**



# Géométrie des Photos aérienne à axe vertical

---



## Définition

les photos prises à partir d'un aéronef en maintenant l'axe optique de la caméra verticale ou presque en tant que possible sont appelées des **Photos aérienne à axe vertical**. les équations développées dans ce chapitre supposent les photographies vraiment verticales. En dépit des précautions prises pour maintenir l'appareil à axe vertical, petites inclinaisons sont toujours présents.

Toutefois, pour des photos destinées à être verticale, inclinaisons sont généralement moins de  $1^\circ$  et dépassent rarement  $3^\circ$ . Photographies contenant ces petites inclinaisons non intentionnelles sont appelés photographies quasi-verticales ou inclinées, et à de nombreuses fins pratiques Ces photos peuvent être analysées en utilisant les équations relativement simples "vraiment verticaux» de ce chapitre sans erreur grave.

# Géométrie des Photos aérienne à axe vertical



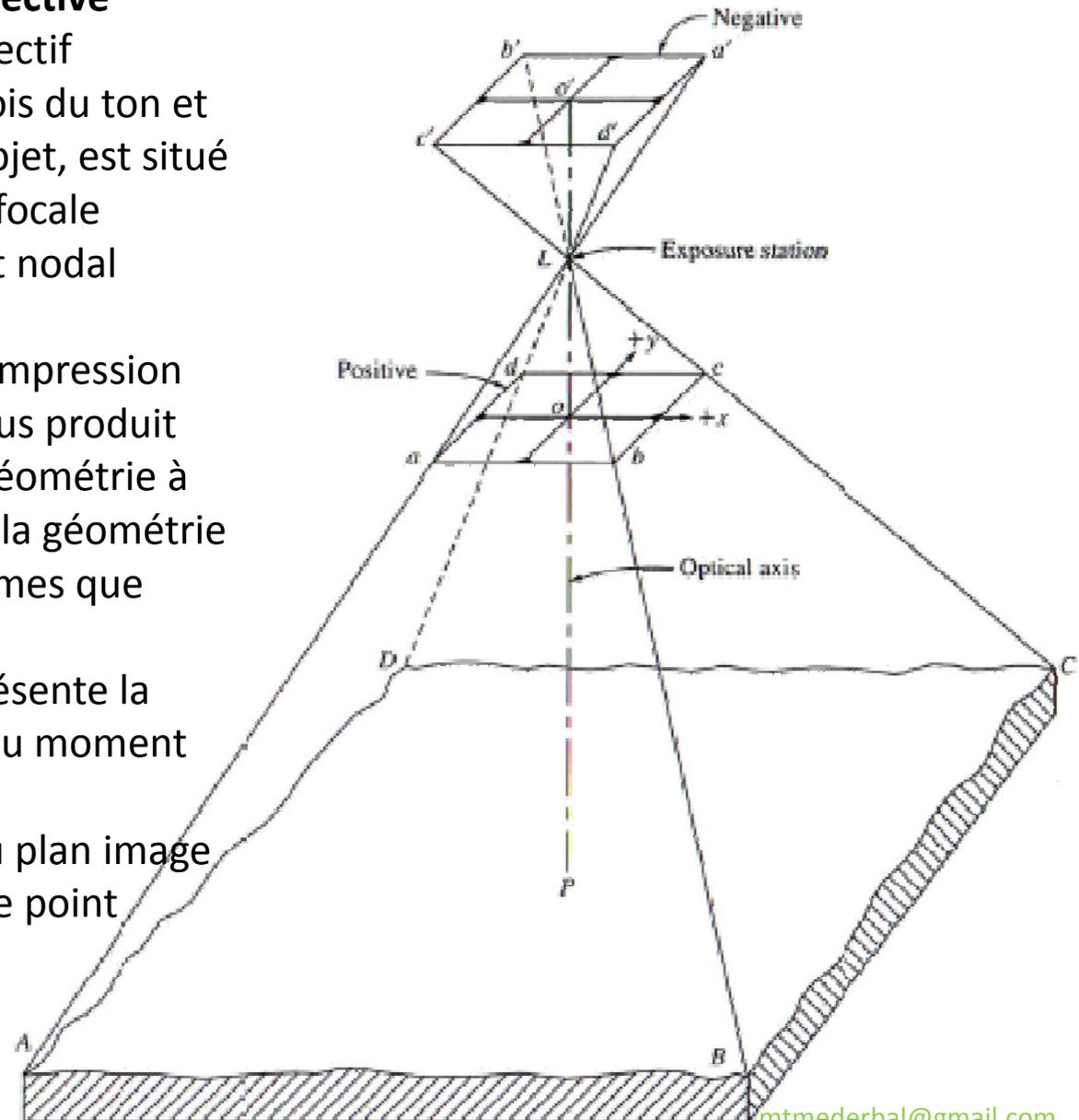
**L:** est le **Centre perspective (Perspective center)** Le centre optique de l'objectif

**Le négatif**, est une inversion à la fois du ton et de la géométrie de l'espace de l'objet, est situé à une distance égale à la distance focale (distance à  $o'L$ ) au-dessus du point nodal arrière de la lentille de la caméra.

**Le positif** peut être obtenu par "l'impression de contact" du négatif. Ce processus produit un renversement de ton et de la géométrie à partir du négatif, et donc le ton et la géométrie du positif sont exactement les mêmes que ceux de l'espace de l'objet.

**Point nadiral** Point au sol qui représente la projection du centre perspective au moment de la prise de vue

**Nadir de l'image:** L'intersection du plan image et la ligne verticale qui passe par le point nadiral et le centre perspective



# Échelle



**Échelle de la carte** est le rapport d'une distance de carte et la distance correspondante sur le terrain.

**l'échelle d'une photographie** est le rapport entre une distance sur la photo de la distance correspondante sur le terrain.

La projection cartographique est une projection orthogonale, cela implique que l'échelle de la carte ne soit pas influencé par les variations de terrain.

Une photographie aérienne, cependant, est une projection en perspective, et comme il sera démontré dans ce chapitre, sa valeur varie sera en fonction des variations de l'élévation du terrain.

Échelles peuvent être représentées comme l'équivalence des unités, ou des rapports sans dimension.

1mm = 10m ou 1/10.000

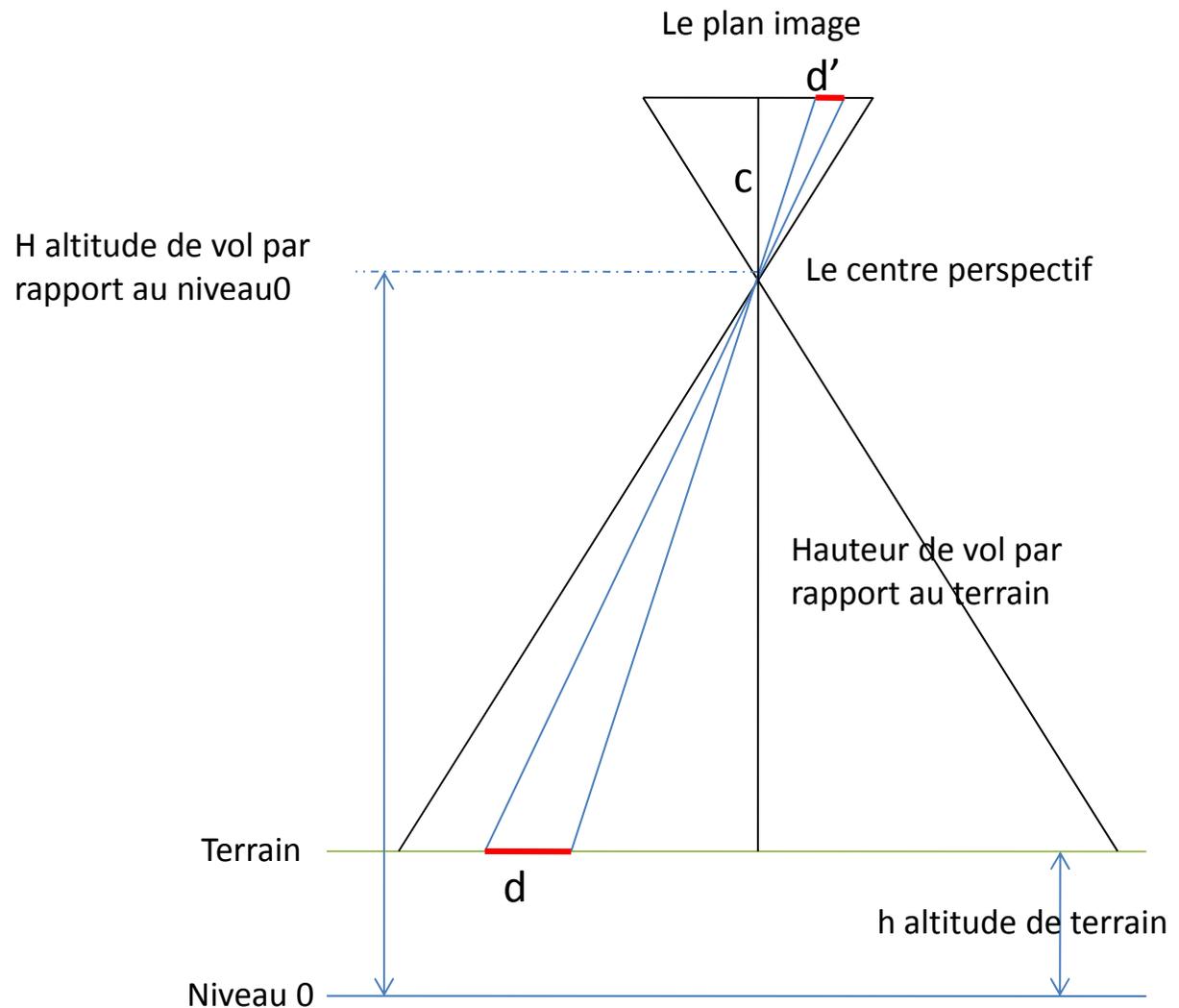
# Échelle d'une photo verticale sur terrain plat



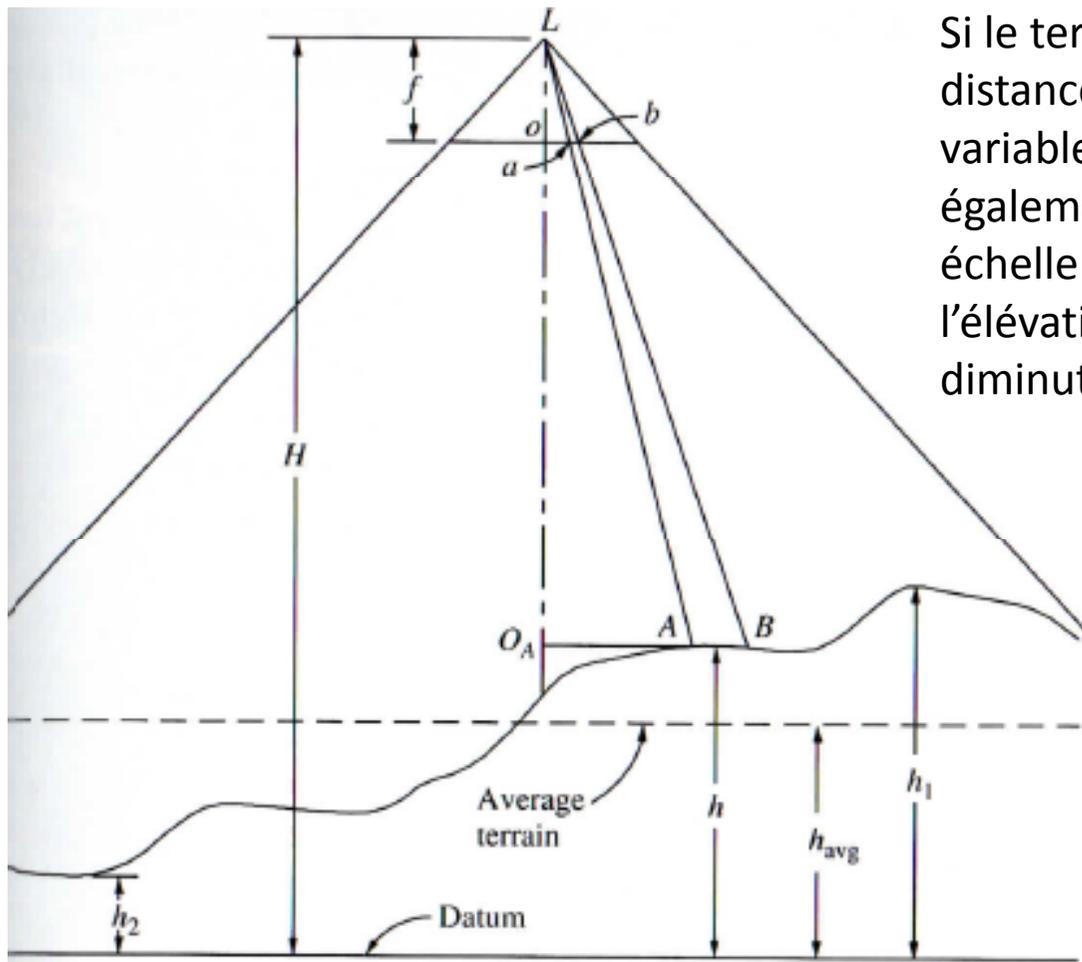
L'échelle photo est 1:E  
E est le facteur  
d'échelle

$$E = (H - h) / c$$

$$E = d / d'$$



# Échelle d'une photo verticale sur terrain variable



Si le terrain photographié varie en élévation, la distance de la photo de l'objet sera également variable et l'échelle de la photo sera également varier. Pour toute photo verticale échelle augmente avec l'augmentation de l'élévation du terrain et diminue avec la diminution de l'élévation du terrain.

Il est souvent commode et souhaitable d'utiliser une échelle moyenne d'une photo verticale prise sur un terrain variable. Échelle moyenne est l'échelle calculée à l'élévation moyenne du terrain couvert par une photographie

$$E_{\text{moy}} = (H - h_{\text{moy}}) / c$$

***Pour les photographies verticales prises sur un terrain de variable, il ya un nombre infini de différentes échelles. Ceci est l'une des principales différences entre une photographie et une carte.***

# Application

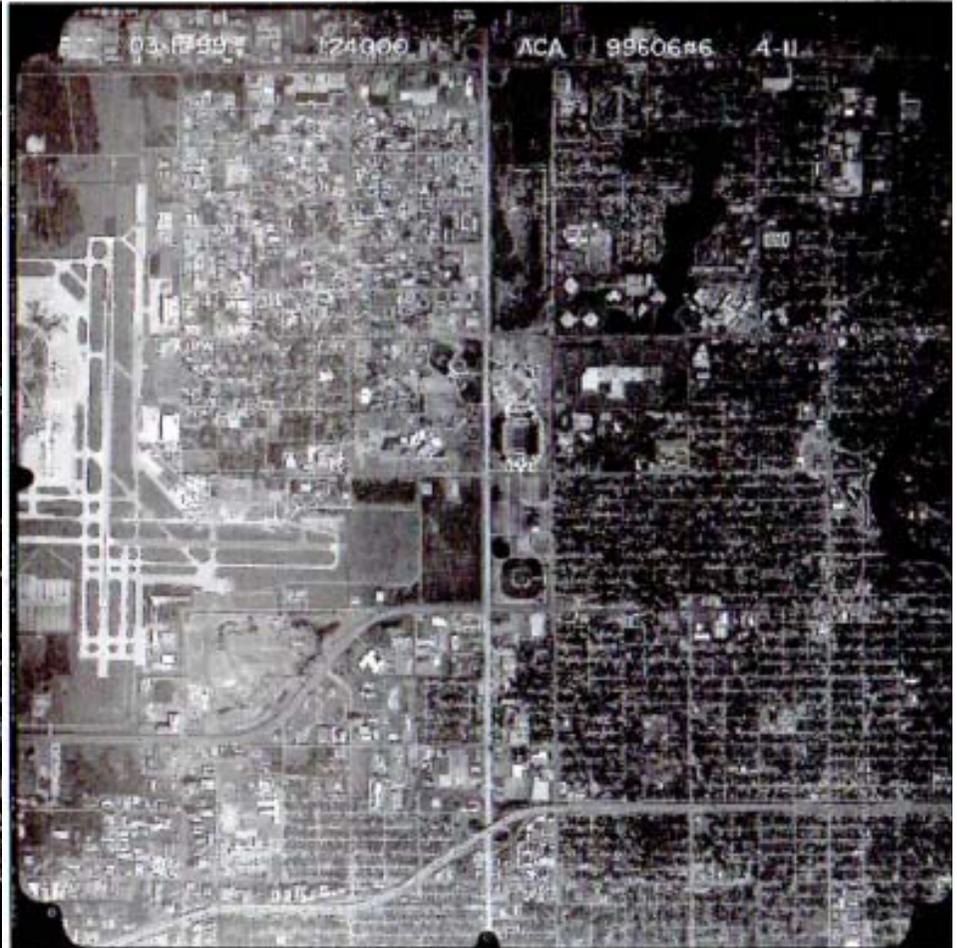


Des photos aérienne à axe verticale de format 230mmx230mm prise avec un appareil de prise de vue avec une distance focale de 152mm.

Quelle serait les échelles respective des photos si la hauteur de vol au dessus d'une terrain plat est : 460m, 910m, 1830m et 3660m



# Application



# Application

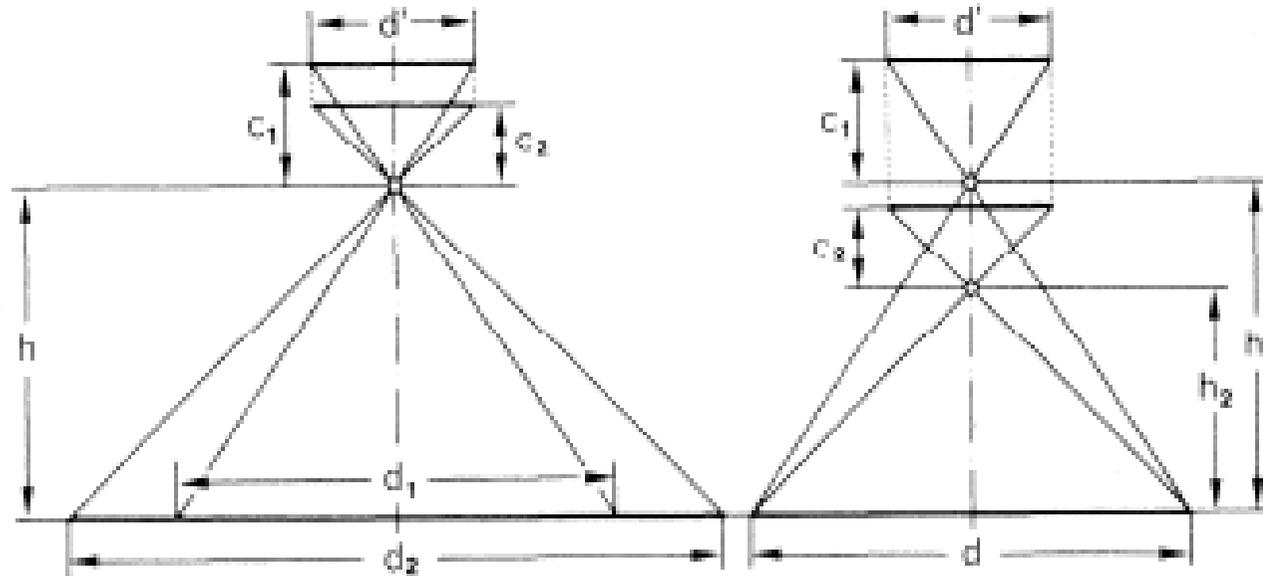
---



Quel serait la hauteur de vol si on veut effectuer des prises de vue aérienne au 1/20.000 en utilisant des focales de 88 mm, 153 mm, 213 mm, 303 mm

Quel seront les échelles à hauteur de vol égale 2300m

# Application



$$M_1 : M_2 = c_1 : c_2$$
$$d_1 : d_2 = c_2 : c_1$$

$$M_D = c_1 : h_1 = c_2 : h_2$$
$$h_1 : h_2 = c_1 : c_2$$

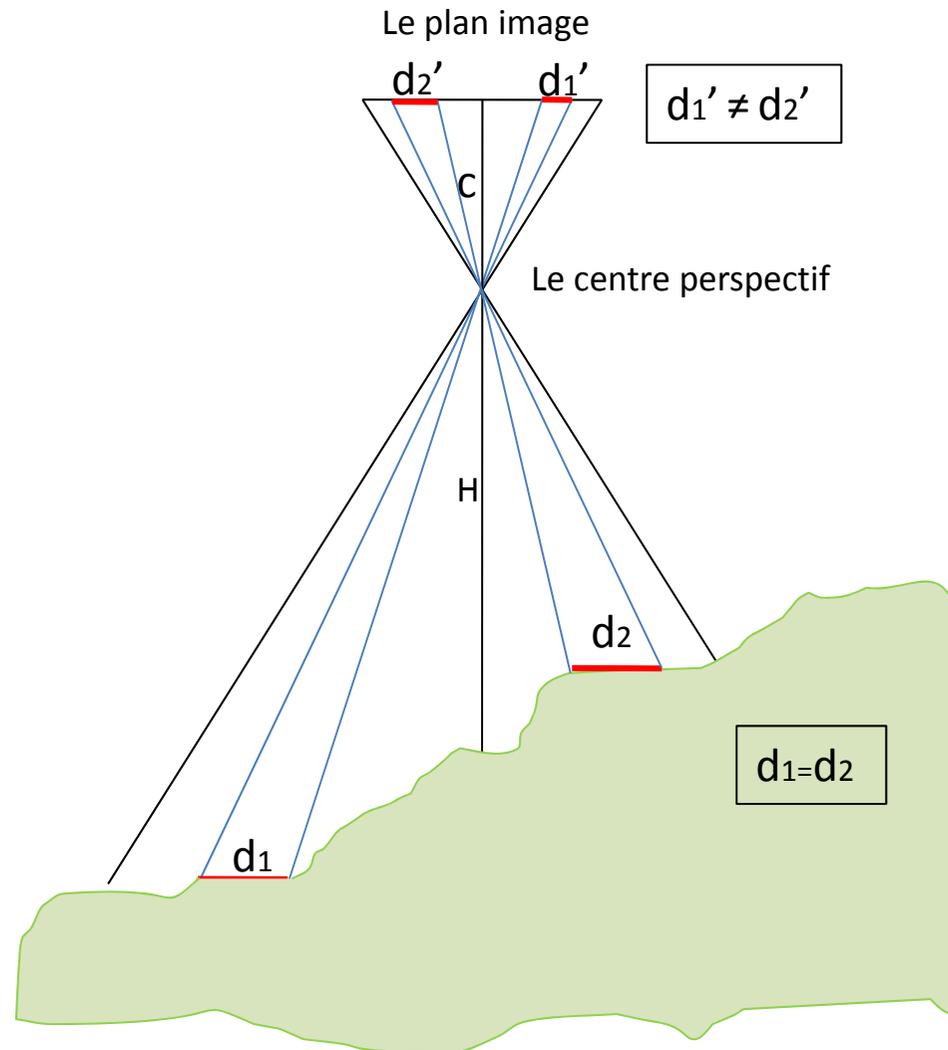
# Effet du relief sur la variation de l'échelle d'une photo



Deux distances identiques sur le terrain  $d_1$  et  $d_2$  seront différents sur l'image.

Ceci est due a la topographie du terrain.

Les objets les plus proches a la camera apparaissent plus grands

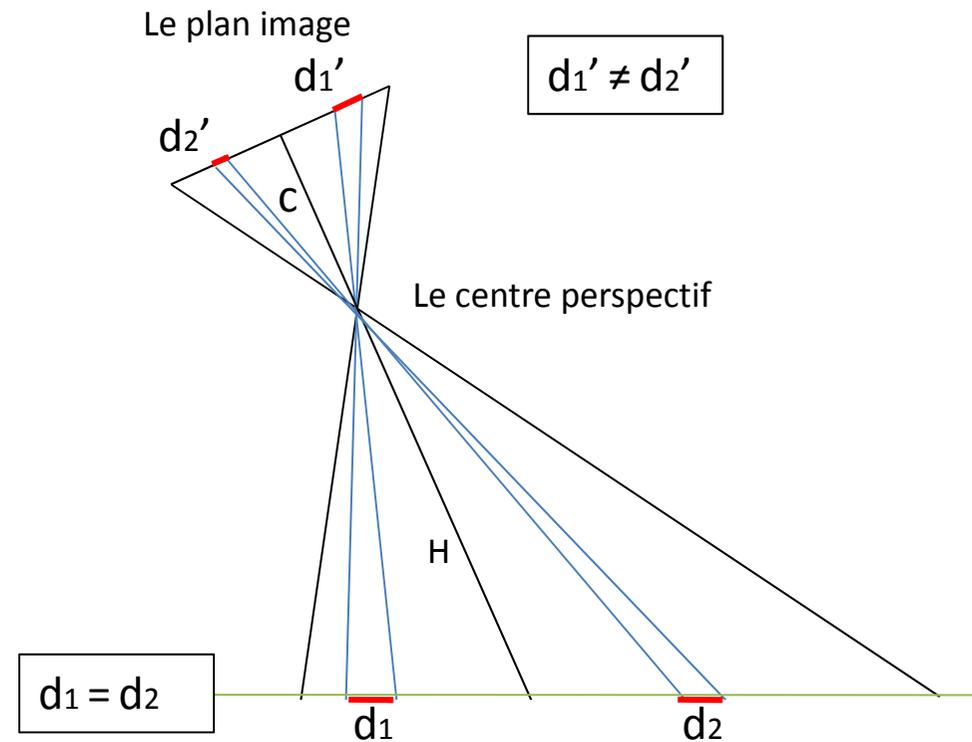


# Effet l'inclinaison de la caméra sur la variation de l'échelle



Deux distances identiques sur le terrain  $d_1$  et  $d_2$  seront différents sur l'image.

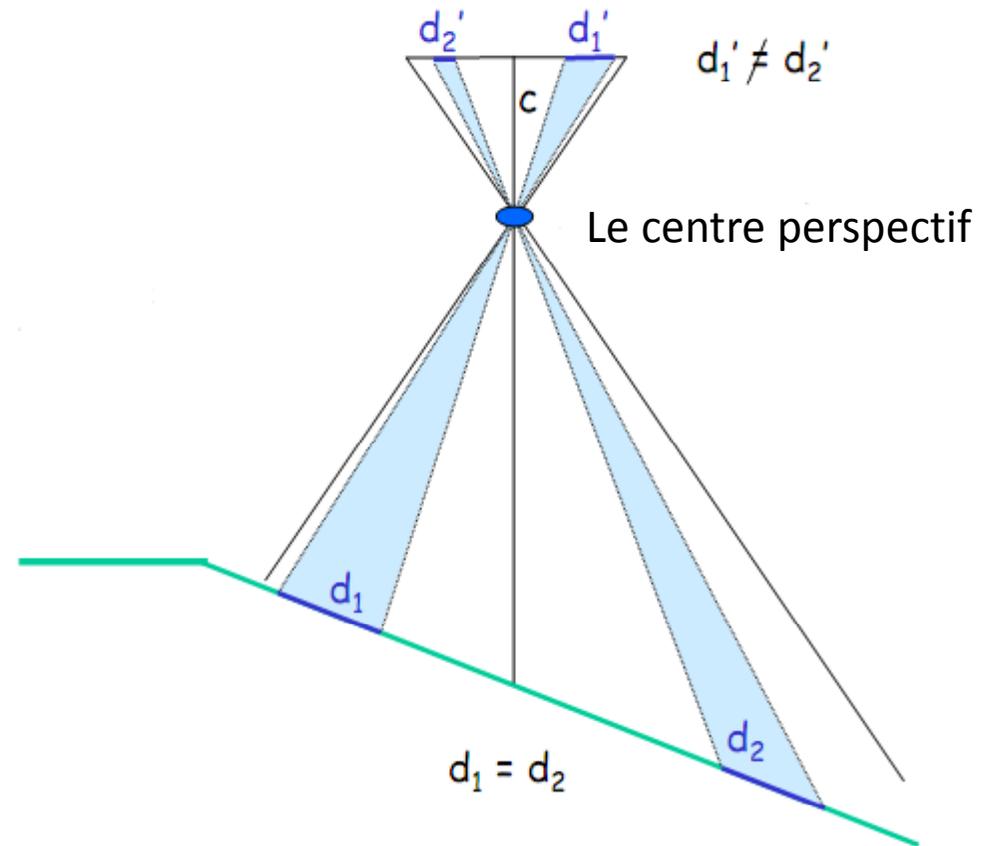
Ceci est due a l'inclinaison de l'axe de prise de vue



# Effet l'inclinaison du terrain sur la variation de l'échelle



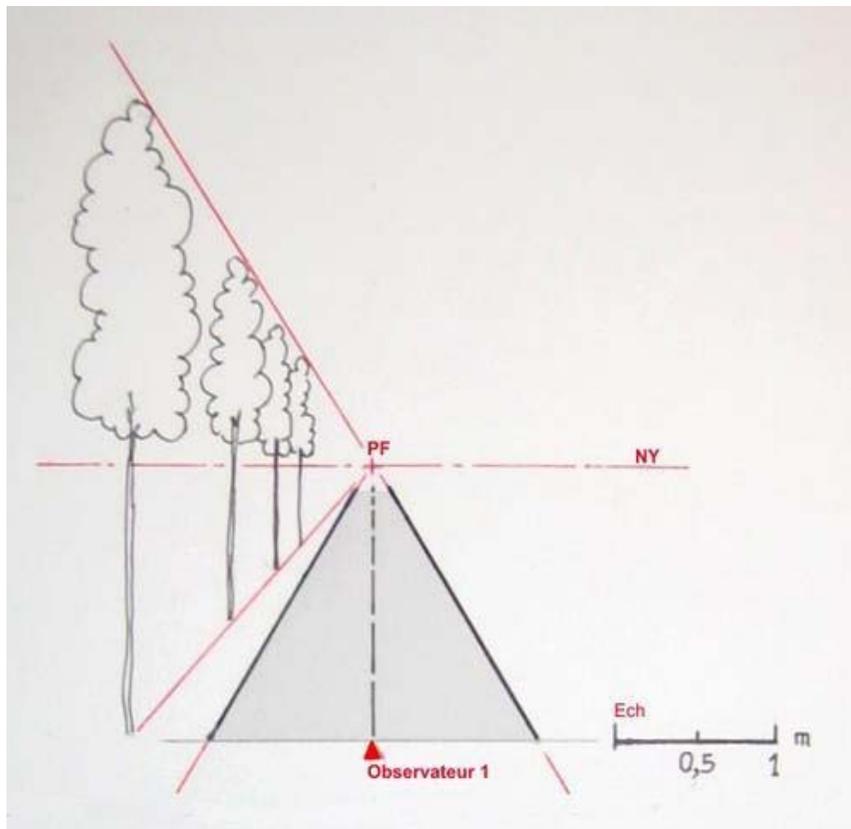
Le même effet que l'inclinaison de camera résulte si le terrain est incliné



# Effet de perspective sur une photo à axe vertical



La perspective linéaire (ou conique) consiste à construire des lignes convergentes en un point de fuite, ces lignes sont dans la réalité, parallèles mais si on les observe de loin, on constate qu'elles convergent en un point. Ce qui permet la diminution des formes les plus éloignées.

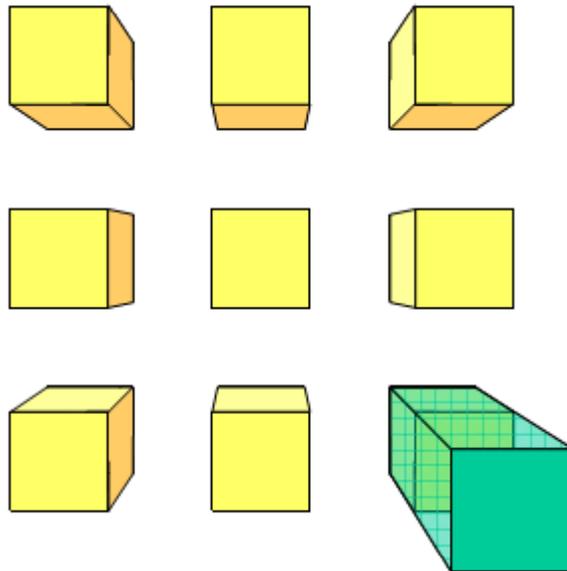


# Effet de perspective sur une photo à axe vertical

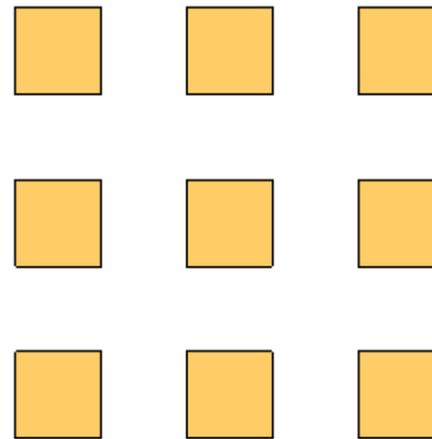


Imaginer qu'on a 9 bâtiments prises sur une photo à axe vertical

Projection centrale (Photo)



Projection orthogonale (carte)



- Déplacement radial
- Différence d'échelle

# Effet de perspective sur une photo à axe vertical



## Exemple pour la Problématique des dévers



Leica RC30

Objectif 15/4 UAG-S

Focale = 153 mm

*La photo est prise dans  
l'hémisphère nord, à  
une latitude d'environ 45°. Elle est  
orientée le nord en haut*

# Effet de perspective sur une photo à axe vertical



## Exemple pour la Problématique des dévers



### **A la verticale du centre de projection**

*C'est, sous certains aspects, la situation idéale, mais très confinée ! Les éléments en hauteur ne sont pas déformés et on ne voit pas les façades. C'est ce qui est recherché pour la production de True Ortho (orthophotos intégrales).*

*On peut mesurer l'emprise du toit, mais pas celle du bâtiment au sens de la Mensuration Officielle.*

*Sur la base de cette seule info, on ne peut pas mesurer la hauteur des objets.*

# Effet de perspective sur une photo à axe vertical



Exemple pour la Problématique des dévers



## Dévers dans une direction

*En haut de la photo, les arbres et les poteaux sont couchés.*

*Visuellement assez dérangement, mais idéal pour mesurer la base et le sommet d'éléments verticaux (hauteur).*

# Effet de perspective sur une photo à axe vertical



## Exemple pour la Problématique des dévers



### Dévers dans une direction

*A droite de la photo, les bâtiments sont vus « de biais ». Visuellement assez dérangeant, mais idéal pour mesurer l'emprise d'un bâtiment (on voit sous les toits), d'un côté au moins.*

# Effet de perspective sur une photo à axe vertical



## Exemple pour la Problématique des dévers



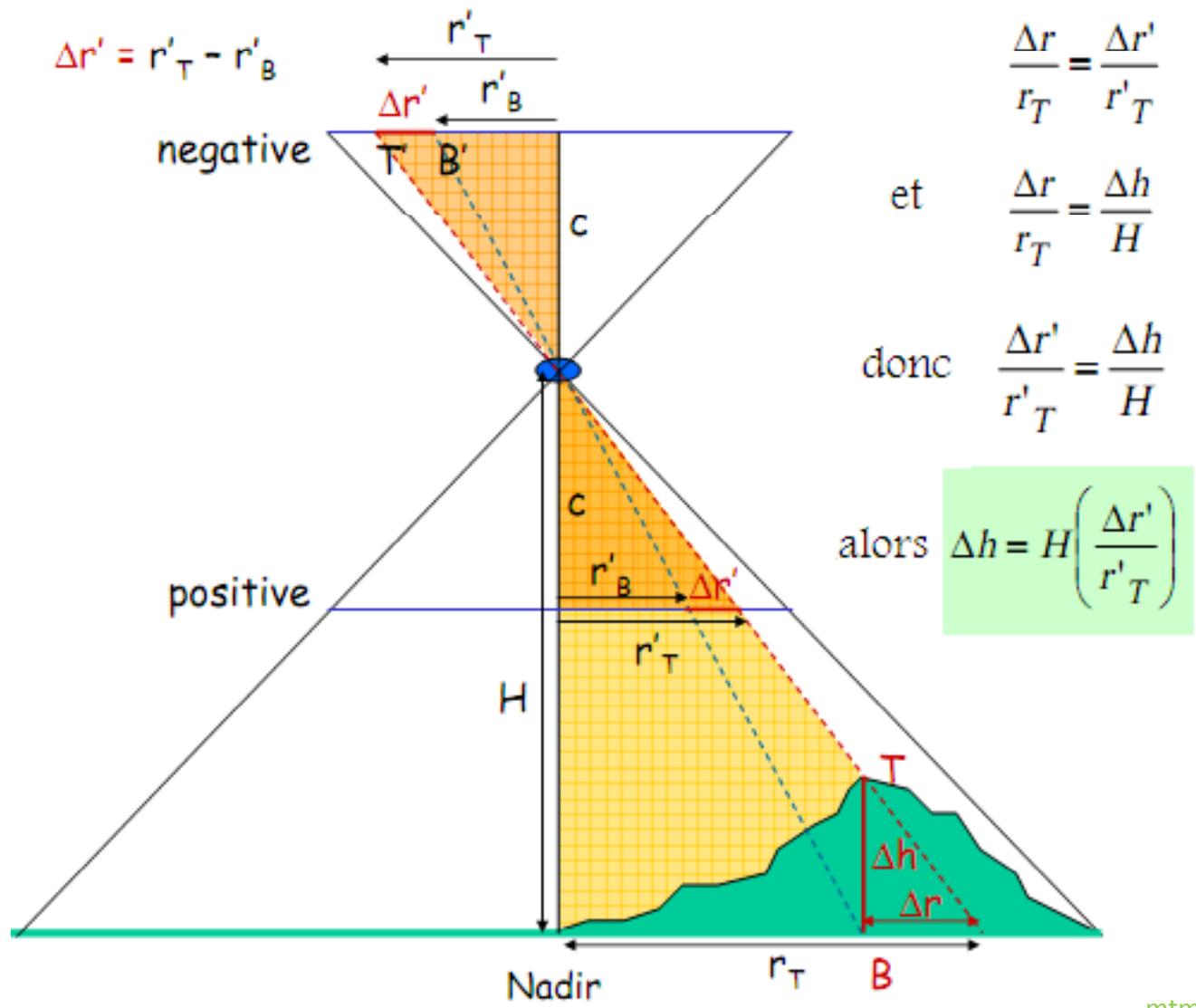
### Dévers dans les deux directions

*En haut à gauche de la photo, combinaison des deux effets précédents. Les rectangles (toits) deviennent des trapèzes. Visuellement assez dérangeant, mais idéal pour mesurer l'emprise d'un bâtiment (on voit sous les toits), de deux côtés.*

# Déplacement du relief sur une photo à axe vertical



Déplacement du relief est le décalage ou le déplacement dans la photographie de la position de l'image provoquée par le relief de l'objet.

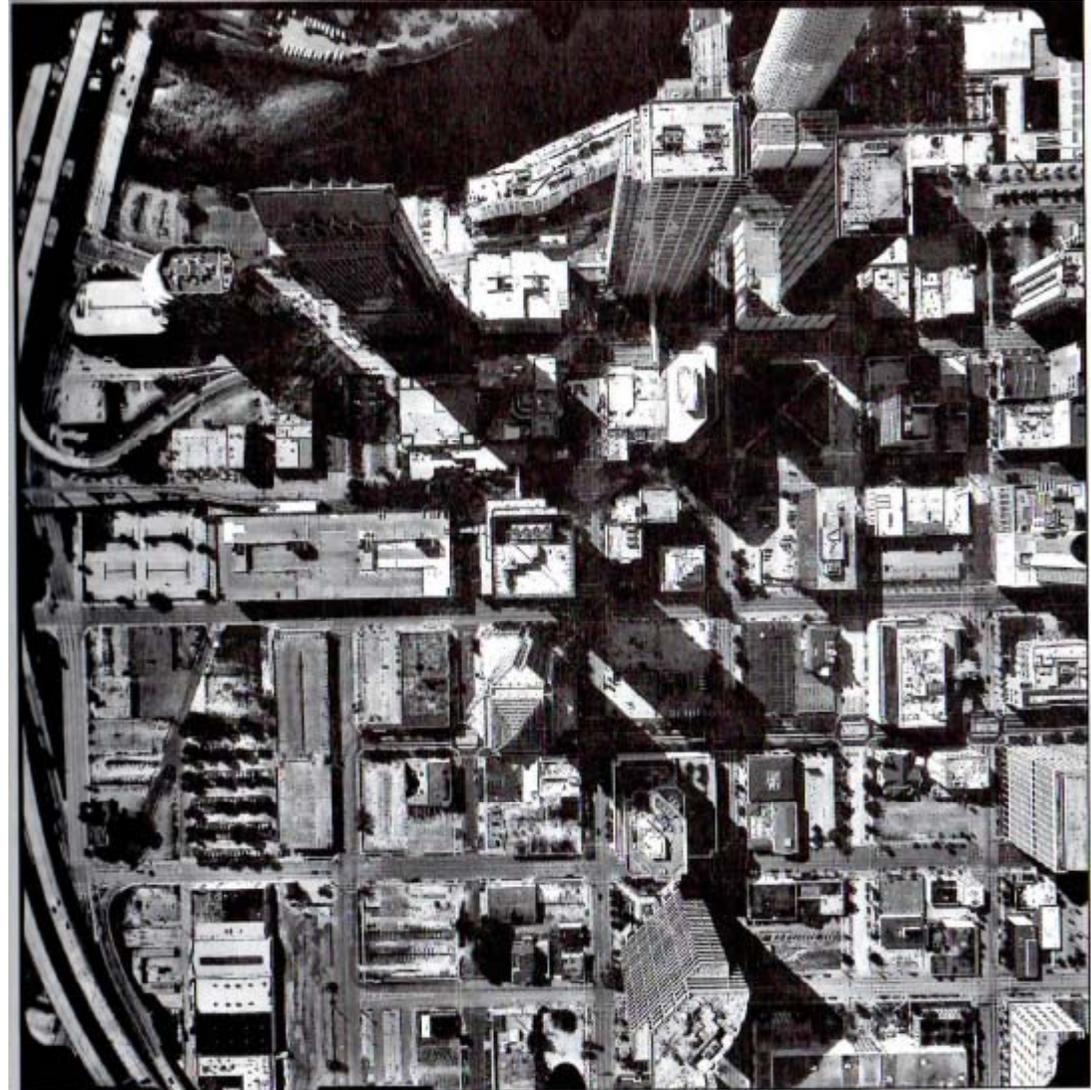


# Déplacement du relief sur une photo à axe vertical



## APPLICATION:

Une photographie verticale prise à partir d'une altitude de 535 m dessus du niveau moyen de la mer (MSL) contient l'image d'une grande tour radio verticale. L'élévation à la base de la tour est de 259 m au-dessus MSL. Le déplacement du relief de la tour a été mesurée comme 54,1 mm, et la distance radiale au sommet de la tour du centre-photo était 121,7 mm. Quelle est la hauteur de la tour?



# APPLICATIONS



## **Exercice N° 1 :**

Calculer la différence d'échelle entre le haut et le bas d'un bâtiment dont la base mesure 50m et la hauteur 300m sur une photo prise avec une camera de  $f=300\text{mm}$  et d'une hauteur de  $H=1500\text{m}$   
Quelle est la dimension de la base et du toit du bâtiment sur la photo ?

## **Exercice N°2**

Soit deux points les plus éloigné sur une photo aérienne distant de 201mm. La distance entre les mêmes points sur une carte au 1/25000 est 507mm. Quelle est l'échelle du cliché

## **Exercice N°3**

La distance entre deux points sur une carte au 1/50.000 est de 31.2 mm. La distance entre les mêmes points est 78 mm sur une photo aérienne prise avec une camera de distance focale 152,72mm. Si ces deux points sont à la même altitude (84m), quelle est la hauteur de vol au dessus de la mer ?

## **Exercice N°4**

Une tour a été identifié sur une photo «parfaitement» verticale et la distance entre le sommet et la base a été mesurée comme étant 1,4 mm et la distance du centre de la photo vers la base de la tour a été mesurée à 85,6 mm être. Si l'échelle de la photographie est de 1: 10,000 et la distance focale utilisé pour prendre cette photo est 152,4 mm, quelle est la hauteur de la tour?

Chapitre VI:  
**Vision stéréoscopique**

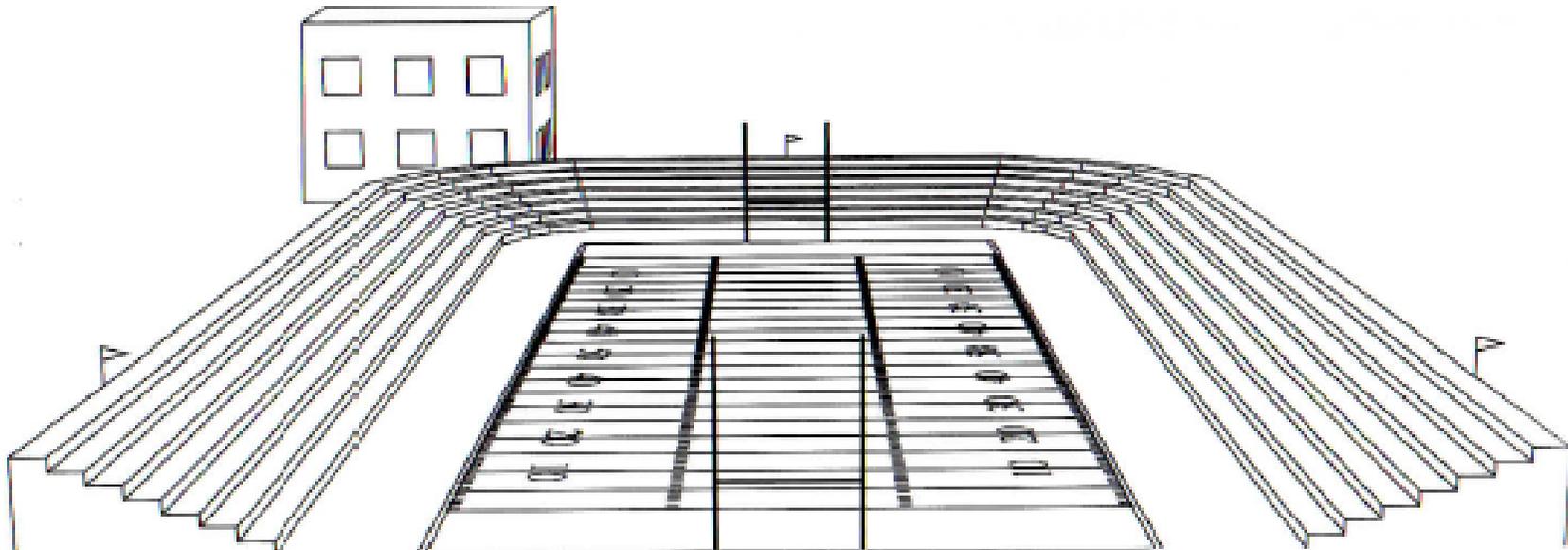


# Perception de profondeur

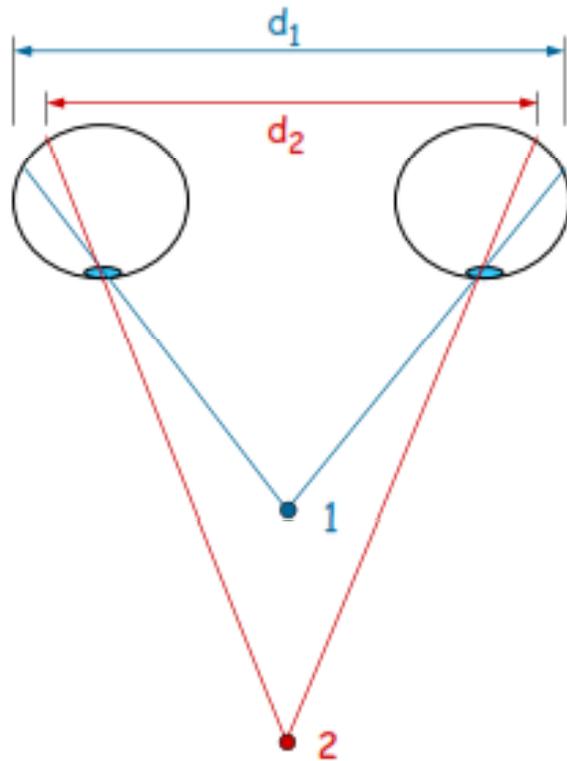


Dans nos activités quotidiennes, nous mesurons inconsciemment la profondeur ou nous jugeons des distances à un grand nombre d'objets sur nous grâce à notre processus normal de vision. Les Méthodes de jugement de profondeur peuvent être classés comme stéréoscopique ou monoscopique.

Les distances des objets, ou des profondeurs, peuvent être perçus en monoscopique sur la base de (1) les dimensions relatives des objets, (2) des objets cachés, (3) les ombres, et (4) les différences de focalisation de l'œil nécessaire pour visualiser des objets à des distances variables.



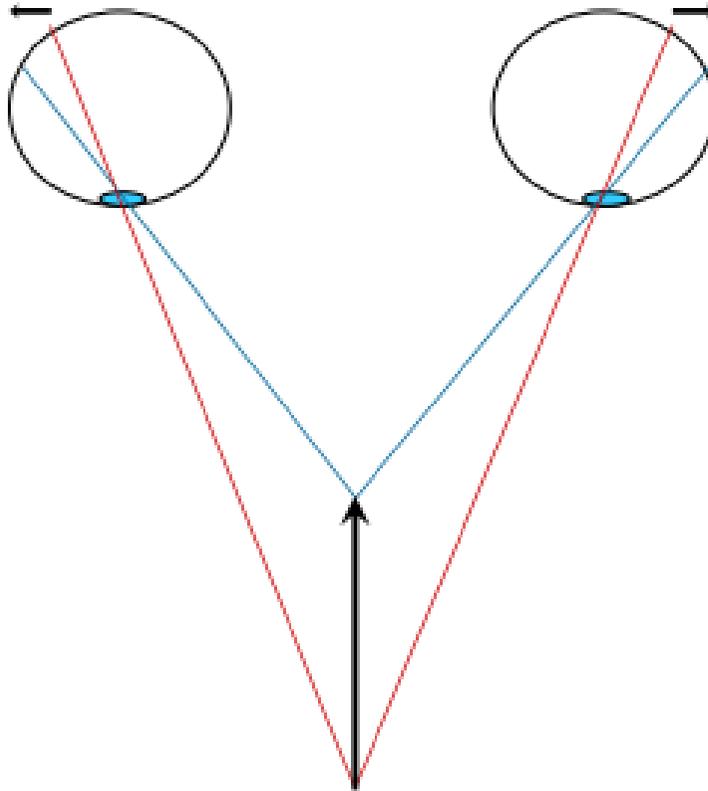
# Vision stéréo humaine



La perception de profondeur est due à l'interprétation par le cerveau de la disparité rétinale, une comparaison entre les positions de projection de l'objet sur la rétine.

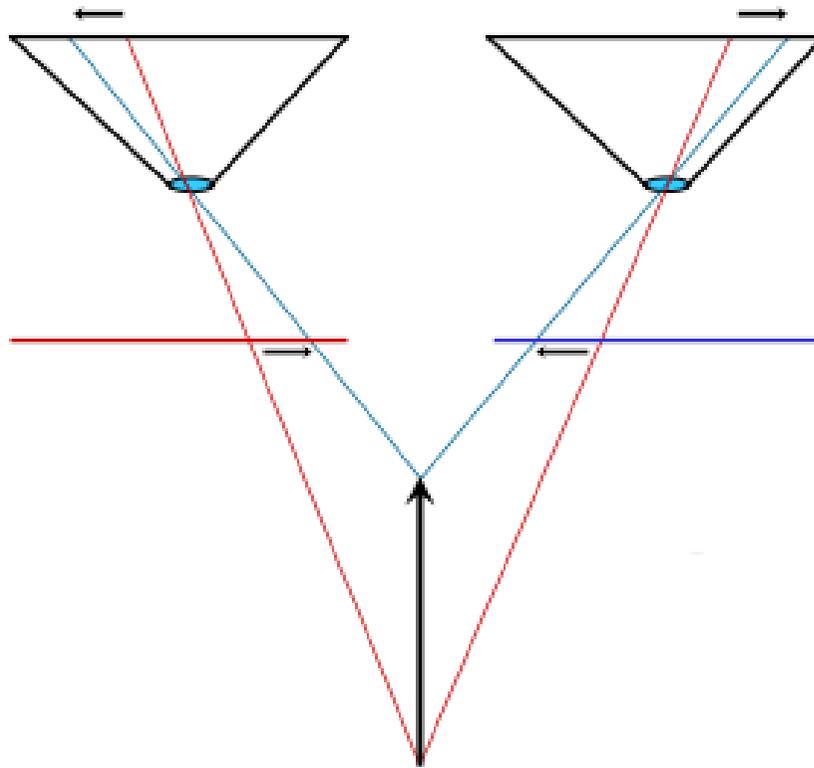
Les objets les plus proche au yeux ont une disparité ou parallaxe plus grande ( $d_1 > d_2$ ).

# Vision stéréo humaine



La flèche en 3D est perçue en stéréo par les deux yeux

# Vision stéréo humaine



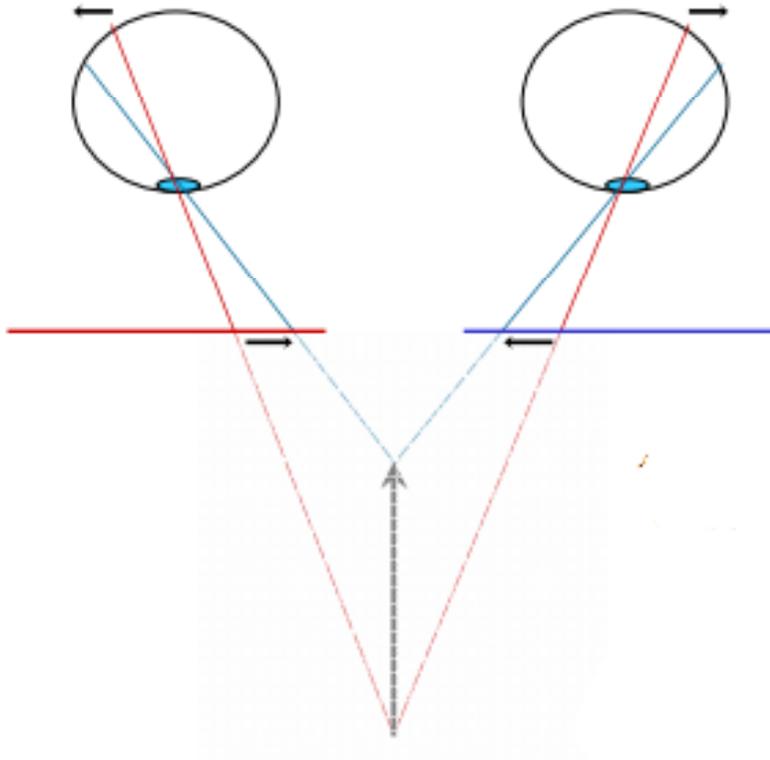
négatif

Les centres perspectifs

positif

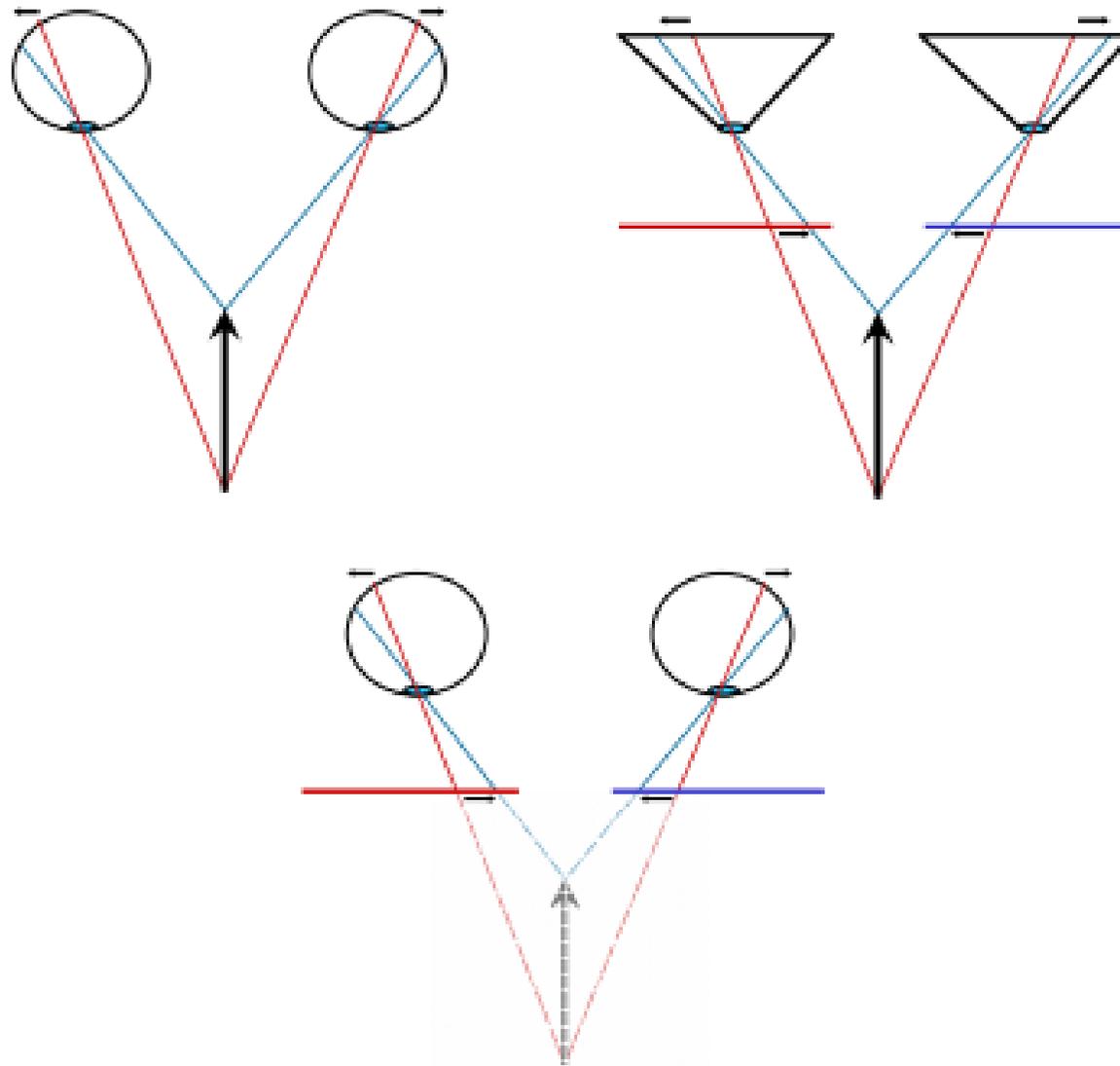
Une même flèche vue sur  
deux images stéréo

# Vision stéréo humaine

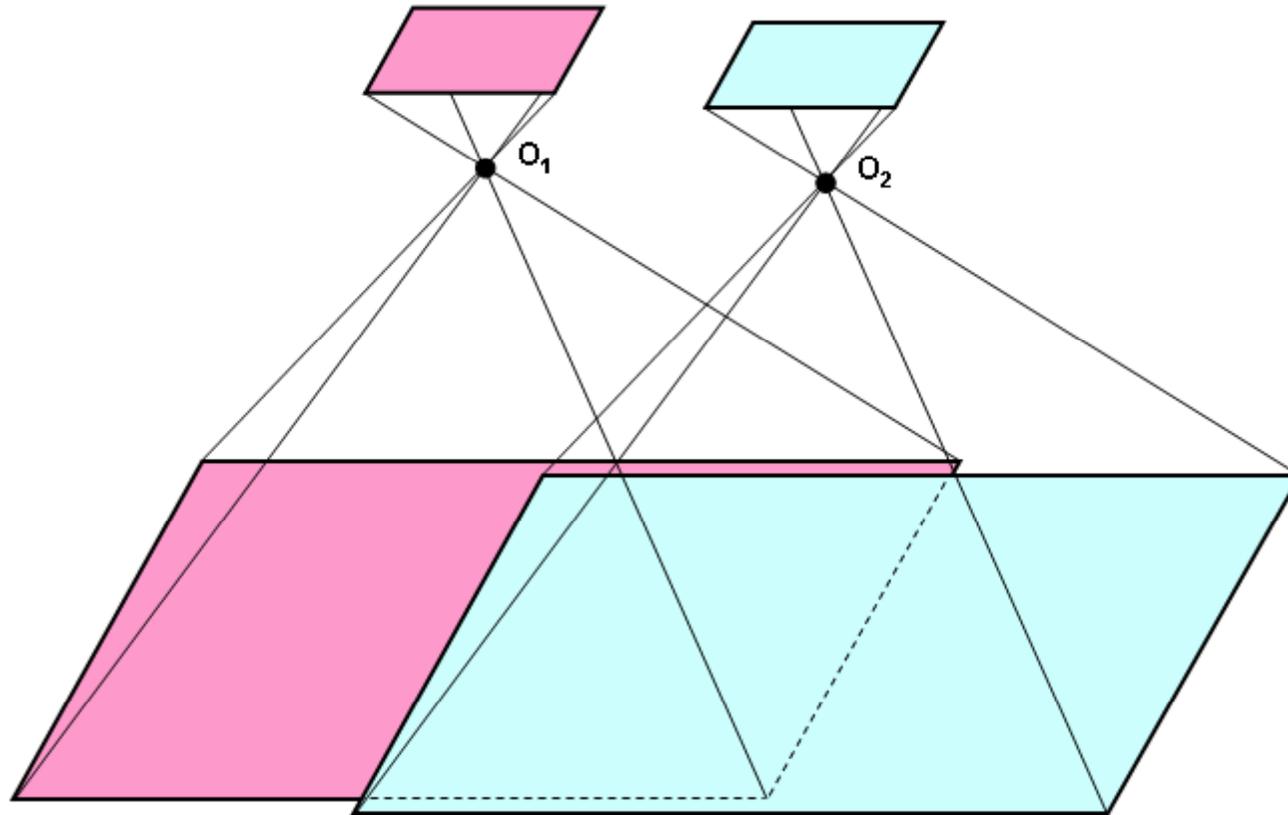


En plaçant deux images stéréo (positives) devant les deux yeux permet de créer exactement la même réception sur les rétines. La même vue stéréo 3D est interprétée par le cerveau malgré que la flèche n'est pas là réellement.

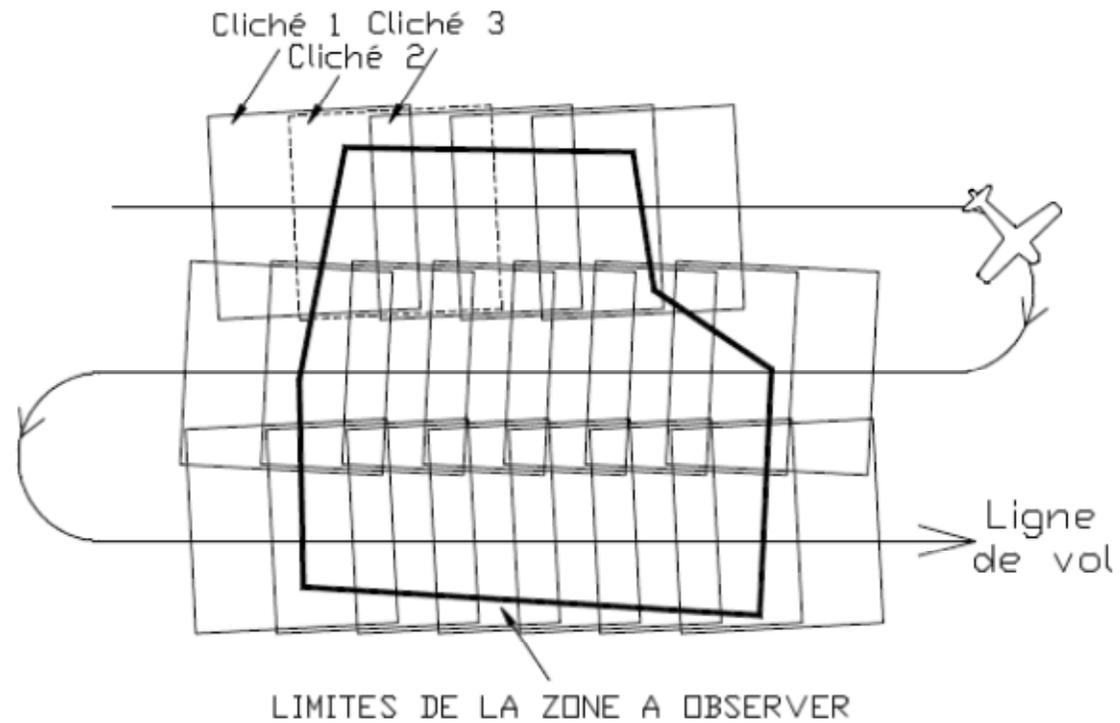
# Vision stéréo humaine



# Recouvrement



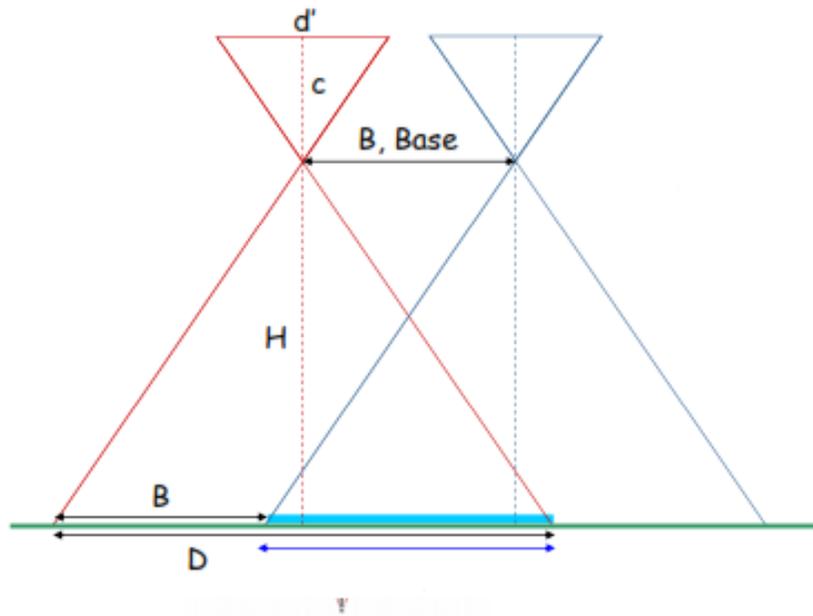
# Recouvrement



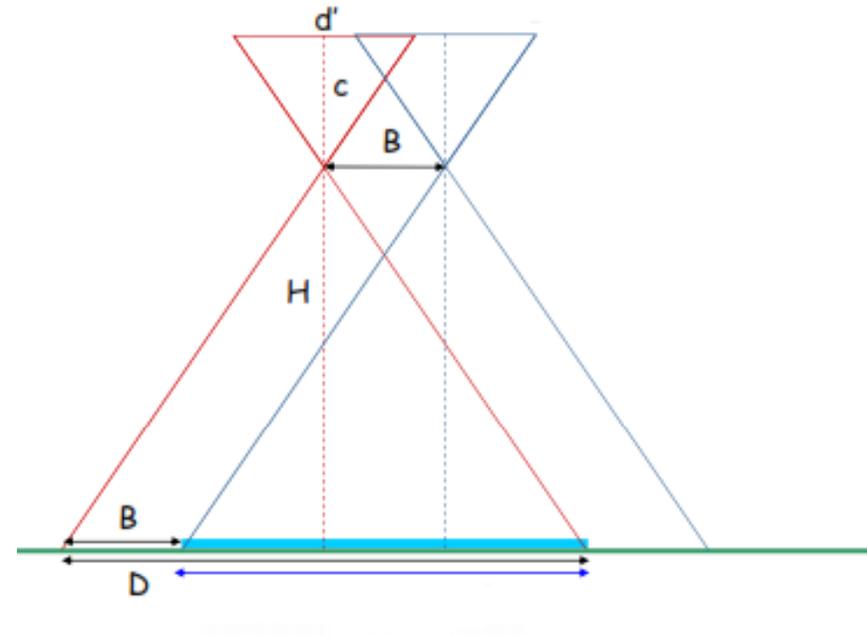
# Recouvrement



60%



80%



Zone de recouvrement= $D-B$

# Recouvrement



Bildformatseite Negative side Côté du négatif Lado del negativo	$d'$	Fläche des Aufnahmegebietes Ground area to be covered Surface du terrain photographié Superficie del terreno a cubrir	$F_a$
Kammerkonstante Calibrated focal length Distance principale Constante focal de la cámara	$c_k$	Flugstreifenlänge Length of flight strip Longueur de la bande de clichés Longitud de la faja de vuelo	$l_p$
Fluggeschwindigkeit Flying speed Vitesse de vol Velocidad de vuelo	$v_a$	Breite des Aufnahmegebietes Width of area to be covered Largeur du terrain photographié Anchura del terreno a cubrir	$l_q$
Längsüberdeckung End lap Recouvrement longitudinal Recubrimiento longitudinal			$p (\%) = \frac{d - b}{d} \cdot 100$
Querüberdeckung Side lap Recouvrement latéral Recubrimiento lateral			$q (\%) = \frac{d - a}{d} \cdot 100$

# Recouvrement

---



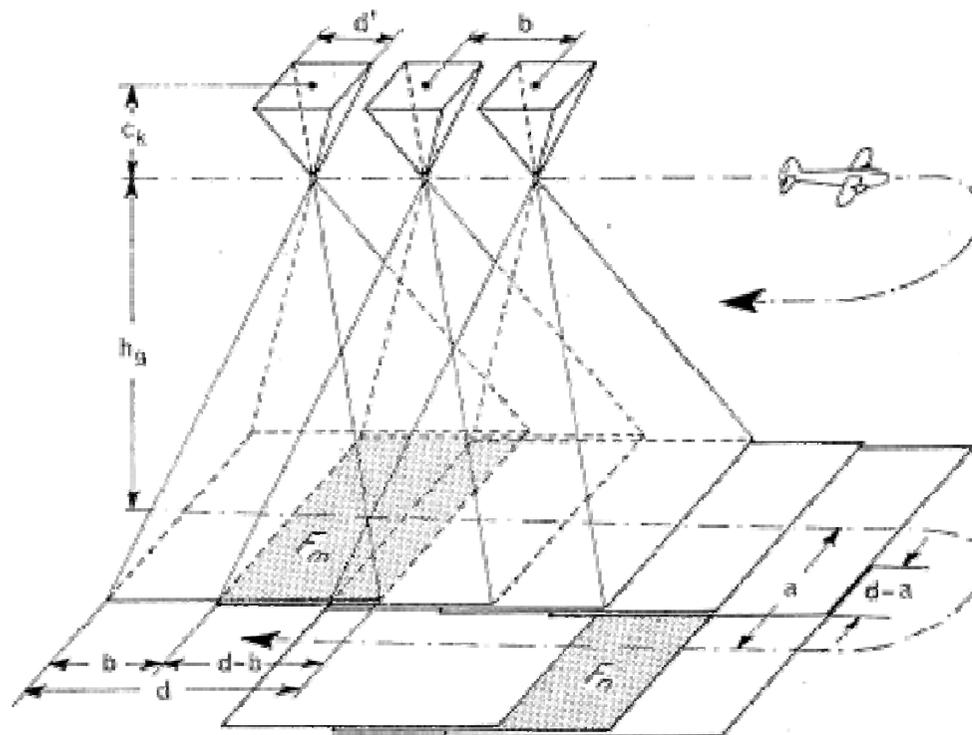
## Recouvrement à 80%

- Quand le terrain est accidenté
- Pour augmenter la visibilité des immeubles dans les zones urbaines
- Pour produire des orthophotos ou mosaïques avec un effet de relief minimum en utilisant juste les centres de photos.
- Pour une aérotriangulation plus stable

## Recouvrement à 60%

- Pour un meilleur rapport B/H, ce qui améliore la précision en Z.
- Moins de photos, traitement plus rapide et moins coûteux.

# Plan de vol



<b>Flughöhe über Grund</b> Flying height above ground Hauteur de vol au-dessus du sol Altura de vuelo sobre el terreno	$h_g = c_k \cdot m_b = \frac{s}{s'} \cdot c_k$
<b>Geländestrecke</b> Ground distance Distance sur le terrain Distancia en el terreno	$s = s' \cdot m_b = \frac{h_g}{c_k} \cdot s'$
<b>Geländefläche eines Bildes</b> Area covered by a single photograph Aire représentée par une image Superficie terrestre cubierta por una foto	$F_a = d^2 = d'^2 \cdot m_b^2$
<b>Basislänge bei p % Längsüberdeckung</b> Length of base with p % end lap Longueur de base avec recouvrement longit. de p % Longitud de base con recubrimiento longit. de p %	$b = d \left(1 - \frac{p}{100}\right)$
<b>Streifenabstand bei q % Querüberdeckung</b> Distance between flight lines with q % side lap Distance entre bandes pour un recouvrement latéral de q % Intervalo entre fajas con recubrimiento lateral de q %	$a = d \left(1 - \frac{q}{100}\right)$
<b>Basisverhältnis</b> Base-height ratio Rapport base-altitude Relación de base	$g = \frac{b}{h_g}$
<b>Bildanzahl pro Streifen</b> Number of photographs per strip Nombre de photographies par bande Cantidad de fotos por faja	$n_p = \frac{l_p}{b} + 1$
<b>Streifenanzahl</b> Number of strips Nombre de bandes Cantidad de fajas	$n_q = \frac{l_a - d}{a} + 1$
<b>Modellfläche</b> Model area Surface couverte par le modèle Superficie estereoscópica	$F_m = (d - b) \cdot d$
<b>Bildfolgezeit</b> Exposure interval Intervalle d'exposition Intervalo de exposición	$\Delta t = \frac{b}{v_g} = \frac{d' \cdot m_b}{v_g} \left(1 - \frac{p}{100}\right)$

# APPLICATIONS



## Exercice N° 1 :

Pour une mission de prise de vue fournissant des photos aérienne de 230mm et de recouvrement de 60% quelle serait la base B si les photos seront dans les échelles :

1/63 000, 1/20 000, 1/4 000

## Exercice N°2:

Soit un chantier photogrammétrique de trois (03) bandes avec 30% de recouvrement latérale et quatre (04) photos de 230mm x 230mm par bande prises à une altitude de vol de 3422m au dessus de la mer en utilisant une focale de 153,52 mm avec un recouvrement longitudinal de 60%

Quelle serait la superficie couverte par ce chantier si l'altitude moyenne du terrain est 352m au dessus de la mer ?

# Bibliographie

---



1. Paul R. Wolf, Bon A. Dewitt ; 3rd edition 2000 ; **Elements of photogrammetry with applications in GIS** ; McGraw-Hill
2. T. Schenk ; 2005 ; **Introduction to Photogrammetry** ; Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science The Ohio State University
3. F. Gervais; 2010; **Éléments de photogrammétrie - Cours de photo-interprétation**; HEIG-VD, G2C. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
4. ERDAS User's guide; 2009; **LPS Project Manager User's Guide**