

TOPOGRAPHIE GENERALE

Année Scolaire
2019/2020

Notes de cours
Ecole Supérieur de Technologie, LAAYOUNE

Ayad BOUTQLMOUNT, Ingénieur
Géomètre Topographe

Sommaire

IV.	Techniques de la topographie.....	3
1.	Lasergrammétrie.....	3
✓	Définition.....	3
✓	Acquisition et matériel utilisé.....	3
✓	Processus de traitement des données issues d'un Laser Scanner.....	5
✓	Résultats et produits dérivés.....	13
2.	Photogrammétrie.....	14
✓	Définition.....	14
✓	Principe de la stéréovision:.....	15
✓	Acquisition de données en photogrammétrie aérienne.....	16
✓	Relation entre l'échelle d'une photographie et les propriétés de la prise de vue.....	18
✓	Éléments pour la planification d'une mission de prise de vue (PVA).....	19
✓	Processus de photogrammétrie.....	19
✓	Appareillage de restitution.....	22
✓	Produits dérivés de la photogrammétrie.....	25

IV. Techniques de la topographie

1. Lasergrammétrie

✓ Définition

La lasergrammétrie ou le relevé par laser-scanner 3D permet l'acquisition, sans contact d'objet, de grandes scènes complexes en trois dimensions. Les résultats sont de véritables présentations numériques des objets et scènes scannées par le relevé de plusieurs millions de points tridimensionnels par seconde. Leurs utilisations permettent un gain de précision dans les mesures tout en offrant dans les plus brefs délais de nouvelles perspectives de résultats et de valorisation.

Un scanner tridimensionnel est un appareil qui analyse les objets ou leur environnement proche pour recueillir des informations précises sur la forme et éventuellement sur l'apparence (couleur, texture, ...) de ceux-ci. Les données ainsi collectées peuvent alors être utilisées pour construire des images de synthèse en trois dimensions (objets numériques) à des fins diverses.



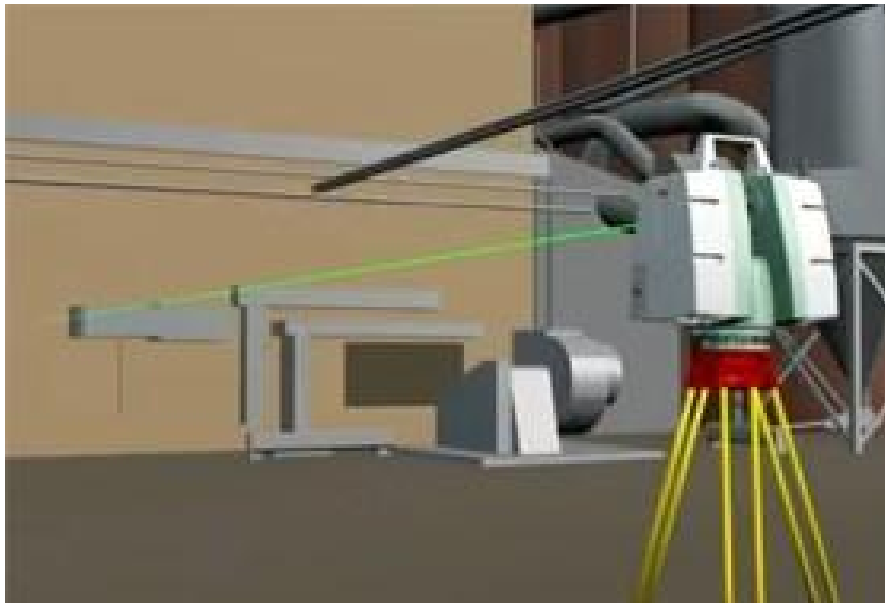
✓ Acquisition et matériel utilisé

L'acquisition est un processus semi-automatique qui demande l'intervention de l'opérateur qui s'occupe essentiellement de la mise en station du scanner et doit impérativement être accompagné d'une équipe qui se charge de placer les cibles tout en assurant le passage entre les différentes stations. Ainsi, l'opérateur doit régler les paramètres du scanner (la portée, le nombre de points, la résolution, la fenêtre d'acquisition...)

À la fin de l'acquisition, on obtient un fichier de points en format texte et/ou sous forme de nuages de points qui doivent être consolidés.

On distingue par ailleurs, pour le relevé de points avec cette technique, 3 principales techniques:

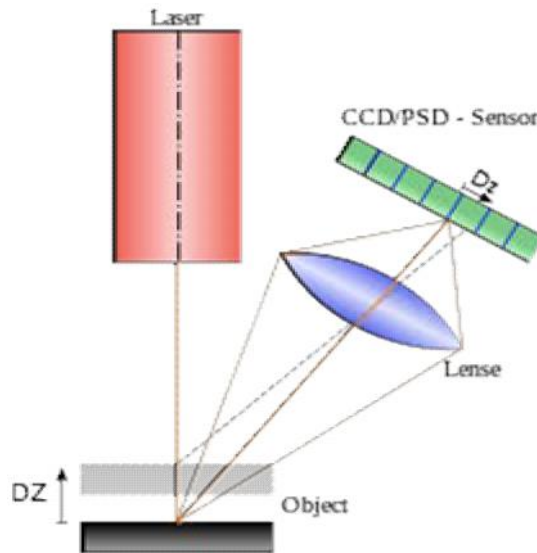
-Scanner par temps de vol: Le scanner 3D LiDAR est un appareil actif qui utilise un faisceau laser pour sonder le sujet. Au cœur de ce type de scanners se trouve un télémètre laser permettant de calculer la distance avec la surface de l'objet étudié en comptant le temps nécessaire au trajet aller-retour de l'impulsion du faisceau laser réfléchi. Puisque la vitesse de la lumière c est connue, le temps de retour permet de déterminer la distance parcourue par la lumière, qui est deux fois la distance entre le scanner et la surface. Si t est le temps de retour, alors la distance est égale à $(c * t) / 2$.



-Scanner par décalage de phase: Le scanner laser pivote à 360° sur lui-même à l'horizontale. L'angle horizontal est calculé simultanément avec la mesure de la distance. La distance ainsi que l'angle vertical et horizontal donnent une coordonnée polaire (r, θ, ϕ) qui sont converties en coordonnées cartésiennes (x, y, z) . Certains scanners laser utilisent la technologie de mesure du décalage de phase pour mesurer la distance par rapport à une surface. L'appareil projette un rayon laser infrarouge qui revient au scanner par réflexion. Celui-ci calcule la distance au millimètre près en analysant le décalage de phase entre le rayon émis et le rayon reçu. Le rayon laser d'une onde sinusoïdale connue est diffusé par une source laser. Il s'agit de la « lumière émise ». Une partie du rayon laser est réfléchi depuis la cible vers la source. On parle alors de « lumière retour ». La phase de cette « lumière retour » est comparée à celle de la lumière émise connue pour déterminer l'« historique de la lumière émise ». La différence entre les deux pics est appelée « décalage de phase ». Le décalage de phase obtenu correspond à $2 \times \text{temps de vol} \times \text{la fréquence de modulation}$. Les scanners à décalage de phase sont généralement plus rapides et plus précis que les scanners laser 3D à temps de vol, mais ils ont une portée plus réduite.

-Scanner par triangulation: Le scanner laser par triangulation est un scanner actif qui utilise également la lumière laser pour sonder son environnement. Il pointe sur le sujet avec un faisceau comme pour celui par temps de vol et utilise un appareil photo pour situer le point. En fonction de la distance jusqu'à une surface, le point apparaît à un endroit différent.

dans le champ de vision de l'appareil. Cette technique est appelée triangulation parce que le point laser, l'appareil photo et l'émetteur laser forment un triangle. La longueur d'un côté du triangle, la distance entre l'appareil photo et l'émetteur laser, est connue. L'angle du côté de l'émetteur laser est également connu. L'angle du côté de l'appareil photo peut être déterminé en regardant l'emplacement du point laser dans le champ de vision de l'appareil photo. Ces trois données déterminent la forme et les dimensions du triangle et donnent la position du point laser.



✓ Processus de traitement des données issues d'un Laser Scanner

La chaîne classique de traitement des nuages de points issus d'un Laser-Scan (après acquisition) est composée des étapes suivantes : la consolidation, le nettoyage, la segmentation, la modélisation et la texturisation dans quelque travaux poussés d'ordre architectural ou patrimonial.

La consolidation

C'est « Le recalage 3D des nuages laser constitue la première étape d'un processus de traitement des données qui précède toute opération de modélisation architecturale afin de parvenir à la géométrie de l'objet scanné. »

L'assemblage de tous les nuages de points acquis depuis les différentes stations sera donc la base de tout post-traitement. En effet pour le relevé de larges scènes, une seule station ne suffit généralement pas pour obtenir l'ensemble du volume 3D. C'est pourquoi la problématique de recalage relatif entre en jeu.

De ce fait, la consolidation n'est autre que le rassemblement des différents nuages de points en un seul et les recaler dans un référentiel unique. Ceci peut être réalisé selon trois méthodes :

- La première méthode consiste à mesurer très précisément les coordonnées des cibles positionnées autour de l'objet numérisé en utilisant un tachéomètre et un cheminement polygonal. Pour une cible donnée, on va affecter les mêmes coordonnées dans l'ensemble des nuages de points;
- La deuxième méthode consiste en un regroupement «nuage par nuage»: elle nécessite que les différents nuages de points présentent des recouvrements. L'opérateur doit sélectionner trois points communs sur chaque nuage. Le logiciel recherche alors le point homologué dans chaque nuage de points. Il utilise par exemple l'algorithme «*Iterative Closest Point*» (ICP) ou méthode du plus proche voisin qui se base sur les moindres carrés, et permet d'aligner les nuages en tenant compte de la totalité des points du nuage;
- La troisième méthode consiste à faire coïncider des éléments communs dans les différents nuages de points. Ces éléments peuvent être soit des cibles, soit des sphères d'un rayon connu par le logiciel. Lors de la numérisation, il faut veiller à ce qu'il y ait au moins trois sphères visibles. En effet, seules trois sphères sont nécessaires pour pratiquer cette méthode. Un nombre plus élevé de sphères est cependant souhaitable pour compenser les erreurs de mesure.

Le géoréférencement se base sur une transformation Helmert 3D à 6 ou 7 paramètres (le facteur d'échelle est souvent négligeable grâce au compensateur interne du scanner 3D, qui permet de contrer tout mouvement du scanner), facilitant la détermination des différents paramètres de transformations (Translations T_x , T_y , T_z ; Rotations x , y , z ; Facteur d'échelle μ), telle que:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \mu * R * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_1$$

Équation 1: Transformation d'Helmert entre deux systèmes de coordonnées

avec :

$$R(\theta)_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} R(\theta)_y = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$R(\theta)_z = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

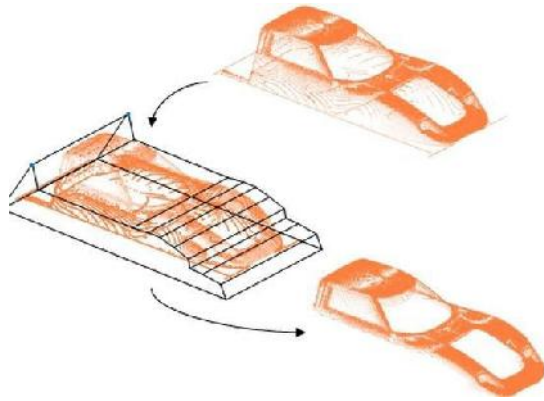
Équation 2: Matrices de rotation de la transformation d'Helmert

Le nettoyage

Une fois la consolidation effectuée et validée, il faut nettoyer le nuage afin de supprimer les points aberrants ou indésirables et limiter l'influence du bruit. En effet, lorsque la réflectance d'un point est trop faible, l'erreur de mesure est augmentée (la qualité du signal retourné est faible), et le point est alors incertain. De plus, le rayon laser ayant un certain diamètre, il est possible qu'il touche deux surfaces distinctes renvoyant un signal faux. Ce bruit inhérent aux mesures peut ajouter une épaisseur là où il n'y en a pas, qu'il faut donc éliminer au moyen de différents filtres (le bruit dû au passage de voitures et de personnes doit être écarté manuellement).

En outre, la densité de points étant généralement non constante suivant la position des différentes stations de scans, il existe des solutions d'échantillonnage. Suivant la méthode

utilisée, il est possible d'échantillonner le nuage de points pour garder une densité de points constante, ou suivant les discontinuités, etc., permettant d'alléger le nuage de points sans perte d'informations utiles.



Nettoyage d'un nuage de points

La segmentation

Le processus de segmentation des nuages de points est une étape essentielle dans la chaîne de traitement. Elle conditionne la pertinence et la précision d'une reconstruction de la scène ciblée. En effet, c'est elle qui sera la base d'une analyse du contenu total en différents sous-groupes aux propriétés différentes, apportant des informations en amont. C'est donc cette étape qui permet de dégager les différents éléments constitutifs d'un nuage de points pour être traité, analysé et modélisé.

La segmentation manuelle de nuages de plusieurs milliards de points étant extrêmement laborieuse, la recherche d'une automatisation d'un tel processus est au cœur des recherches laser grammétriques. De ce fait, il existe différentes approches de segmentation automatique ou semi-automatique qui diffèrent selon l'approche théorique sous-jacente, le critère de similarité retenu au sein d'un groupe de points, les besoins logiciels et algorithmiques, mais surtout de par les résultats et les objectifs du travail.



Algorithme appliqué à plusieurs colonnes

La modélisation

La définition du modèle

«Le modèle est d'abord la «maquette», l'objet réduit et manipulable qui produit en lui sous une forme simplifiée, « miniaturisée », les proportions d'un objet de grandes dimensions, qu'ils s'agisse d'une architecture ou d'un dispositif mécanique. L'objet réduit peut être soumis à des mesures, des calculs, des tests physiques qui ne sont pas appliqués commodément à la chose produite. La notion de modèle est associée à une idée de simplification systématique.»

Techniques de modélisation:

Il y a deux principales techniques de modélisation:

- **La modélisation géométrique**

Elle se fait selon différentes méthodes, souvent complémentaires :

- La modélisation à base de primitives géométriques qui s'appuie sur le travail de l'opérateur et une série de primitives géométriques (point, segment, courbe, boîte, cylindre, etc.);



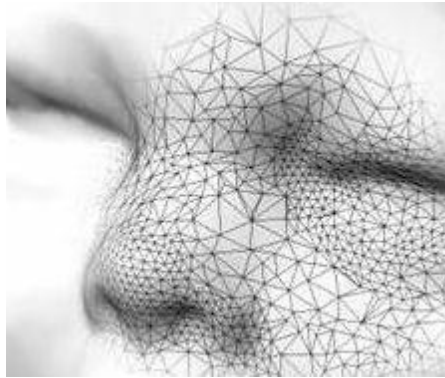
Modélisation primitive d'une colonne,

- La modélisation par reconnaissance automatique et reconstitution, basée sur des outils de géométrie différentielle qui permettent la segmentation automatique de nuages de points. Quoique rapide d'un fait, son automatiser, la méthode est inadaptée aux objets architecturaux en général;
- la modélisation à partir de bibliothèques « métiers » paramétriques. Cette logique de développement peut se révéler intéressante, cependant les bibliothèques existantes ne possèdent pas à l'heure actuelle de primitives ou objets architecturaux nécessaires à la modélisation architecturale complexe.

• La modélisation polygonale (par techniques de maillage)

Un modèle maillé (polygonal) est un ensemble de sommets, d'arêtes et de faces qui définissent la forme de l'objet que l'on souhaite reconstituer. Les faces sont généralement des triangles, des quadrilatères ou des polygones convexes simples. Contrairement à la modélisation géométrique volumique, la représentation est ici implicite (seules les faces sont explicites).

Il s'agit de la méthode majoritairement utilisée car elle présente les avantages d'être simple à mettre en place et d'être fidèle au nuage de points à modéliser. En contrepartie, selon la définition d'un niveau de détails, un modèle maillé par méthode polygonale sera bien plus lourd et plus compliqué à traiter qu'une modélisation géométrique.



Modélisation par maillage

Les types de modèles

L'obtention d'un modèle suit un processus défini en trois étapes: l'acquisition des données, le traitement des données et la modélisation, c'est-à-dire la création du modèle. Bien que cette méthodologie reste constante, son formalisme peut varier. Nous distinguerons trois types de modèles: le modèle issu d'une restitution, le modèle «tel que saisi» et le modèle «tel que construit».

Le modèle «Tel Que Saisi»:

Le modèle 3D « tel que saisi » est le simple relevé de l'objet. Ainsi la modélisation restera la plus fidèle à l'objet tel qu'il existe. La pertinence du modèle dépend de la qualité et de la nature du relevé.

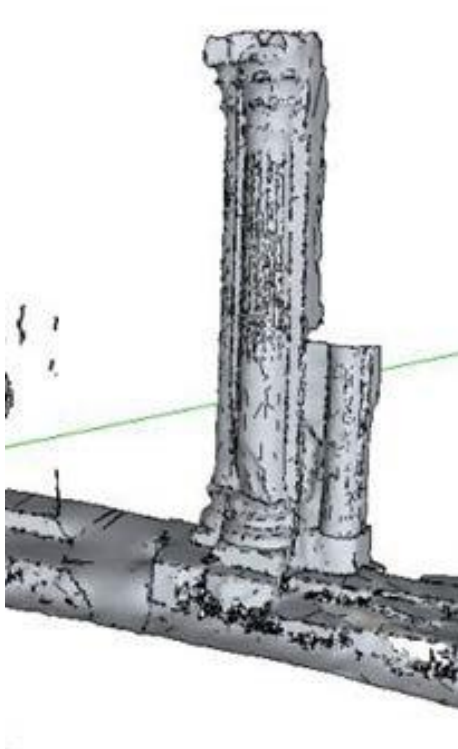
Le modèle «Tel Que Construit»:

Ces types de modèles, surtout utilisés dans l'industrie, sont construits sur la base de mesures effectuées sur l'objet contrairement à une reconstitution. Aucune extrapolation n'est donc établie. Ce modèle est très utilisé en archéologie pour masquer notamment l'effet de l'érosion de la pierre. La modélisation construite sur la base de mesures jugées nécessaires représente un état géométriquement idéal.

La texturisation :

Une fois le modèle maillé, il est nécessaire d'appliquer une texture pour le rendre photo-réaliste. Selon les données en possession, il existe deux manières corrélées d'appliquer l'image ou la texture sur le modèle 3D :

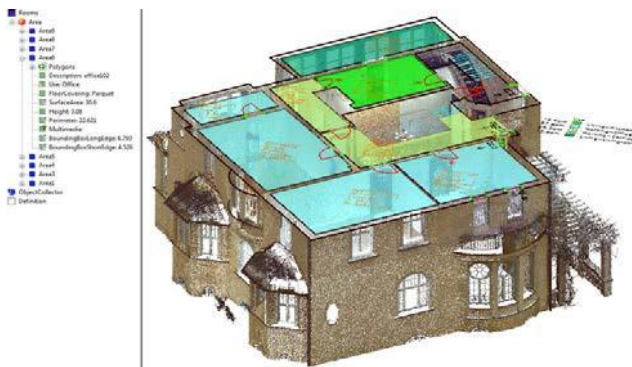
- **Plaquage de la texture par points de référence:** La position, l'orientation et les paramètres optiques de l'appareil photo sont déterminés avec des couples de points. Chaque couple est composé d'un point sur la surface 3D et du point correspondant sur l'image qu'on sélectionne simplement en cliquant (3 à 5 couples sont nécessaires);
- **Plaquage de la texture selon la définition de l'appareil photo et/ou des données photogrammétriques:** Il est possible de renseigner les paramètres photogrammétriques (distorsion de la lentille, origine et orientation de l'appareil, taille des pixels...) que cela soit en photogrammétrie aérienne ou terrestre, ce qui conduit à un plaquage très précis de la texture sur le modèle 3D.



✓ Résultatsetproduitsdérivés

Plusieurs produits sont issus d'un relevéparscannerlaser:

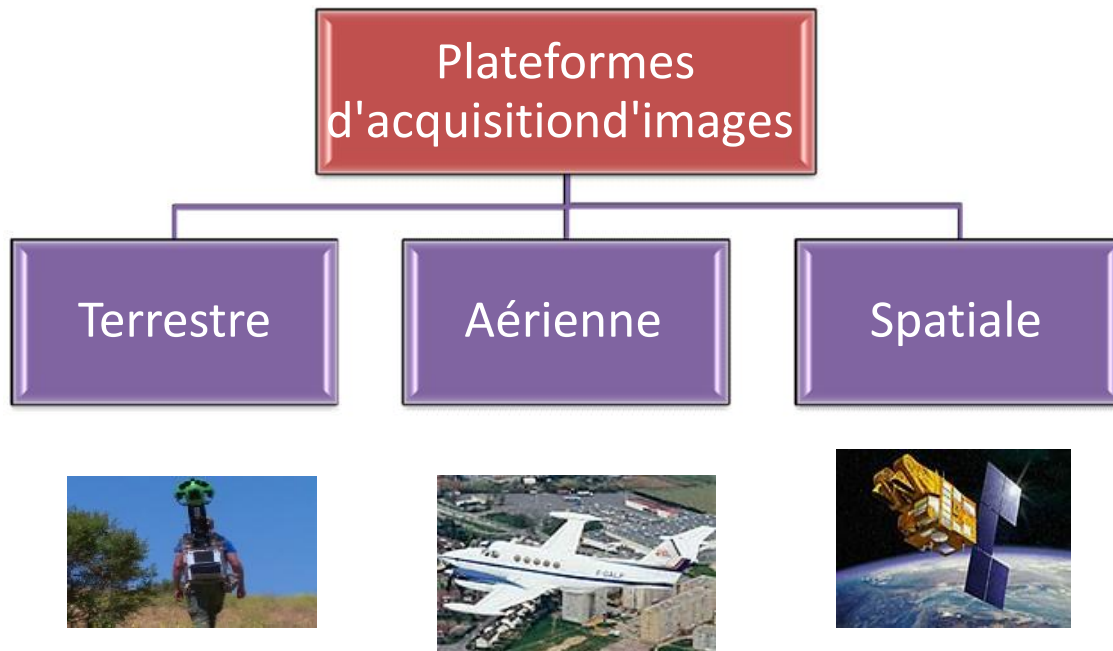
- Nuagedepoints 3D enniveauxdegris ou encouleurs
- Restitutions 2D des objets: plans debâtiments, plans de façades, planscôté.
- Modèles 3D des objets.
- Modèles numériques deterrain (MNT).
- Modèles numériques desurface (MNS).
- Vuespanoramiques.
- Vidéointéactives.



2. Photogrammétrie

✓ Définition

C'est l'art permettant de déterminer et de représenter des objets à partir d'images numériques ou argentiques. On parle de photogrammétrie aérienne ou terrestre.



Le choix de la plateforme dépend bien de :

- ✓ l'application,
- ✓ l'échelle de travail,
- ✓ budget,...

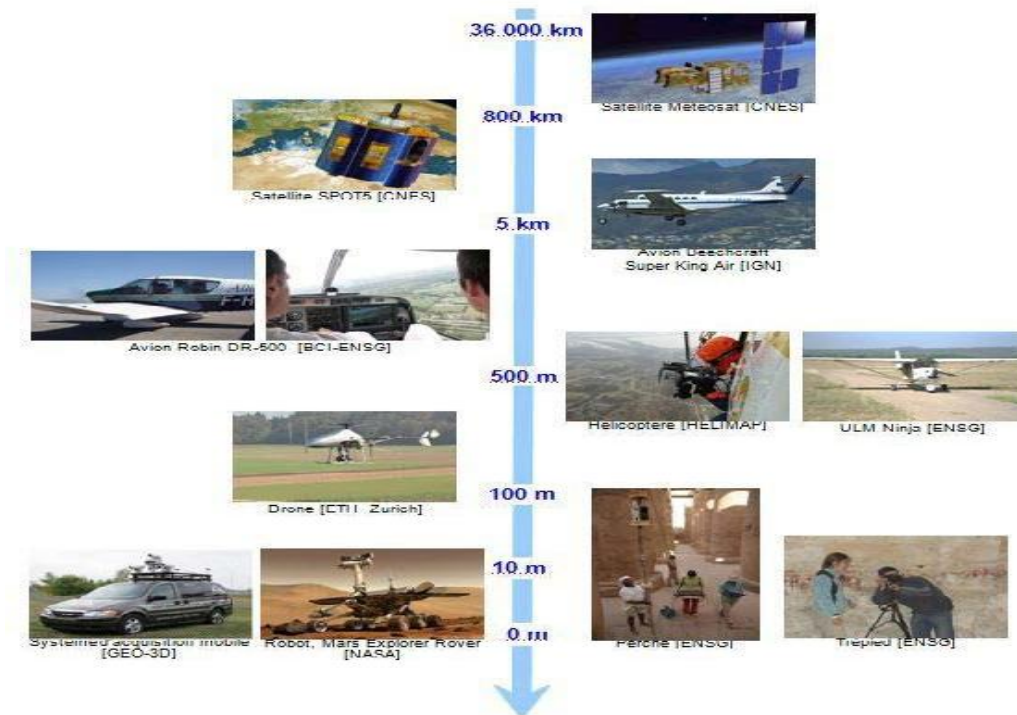


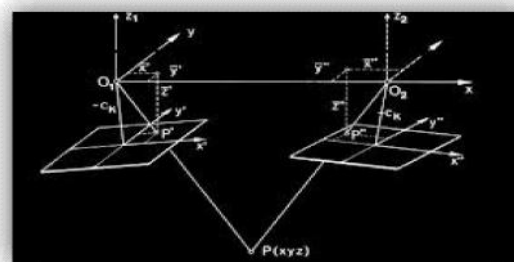
Figure 10 Différentes plateformes d'acquisition

L'un des objectifs principaux de la Photogrammétrie est d'obtenir des plans graphiques à toutes échelles ainsi que des valeurs numériques de n'importe quel point par transformation des projections coniques de photographies en projection orthogonales.

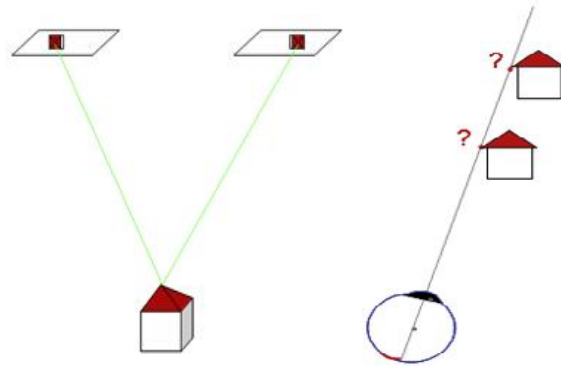
✓ Principe de stéréovision:

Une image constitue un enregistrement plan et déformé de l'environnement. Seule, elle ne permet pas d'obtenir les trois dimensions de l'espace.

Pour reconstruire notre environnement en 3D, il faut deux images (au minimum...) prises de deux points de vue différents et procéder par intersection.

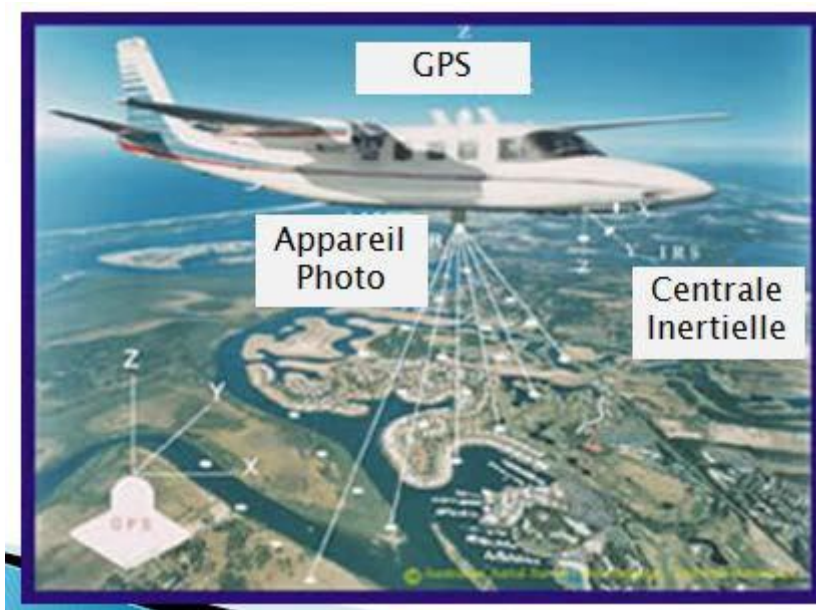


Principe analogue au fonctionnement de notre système visuel naturel. Deux images prises dans des conditions semblables à celles de la vision humaine forment un couple stéréoscopique qui permet de retrouver la sensation de relief par stéréoscopie.

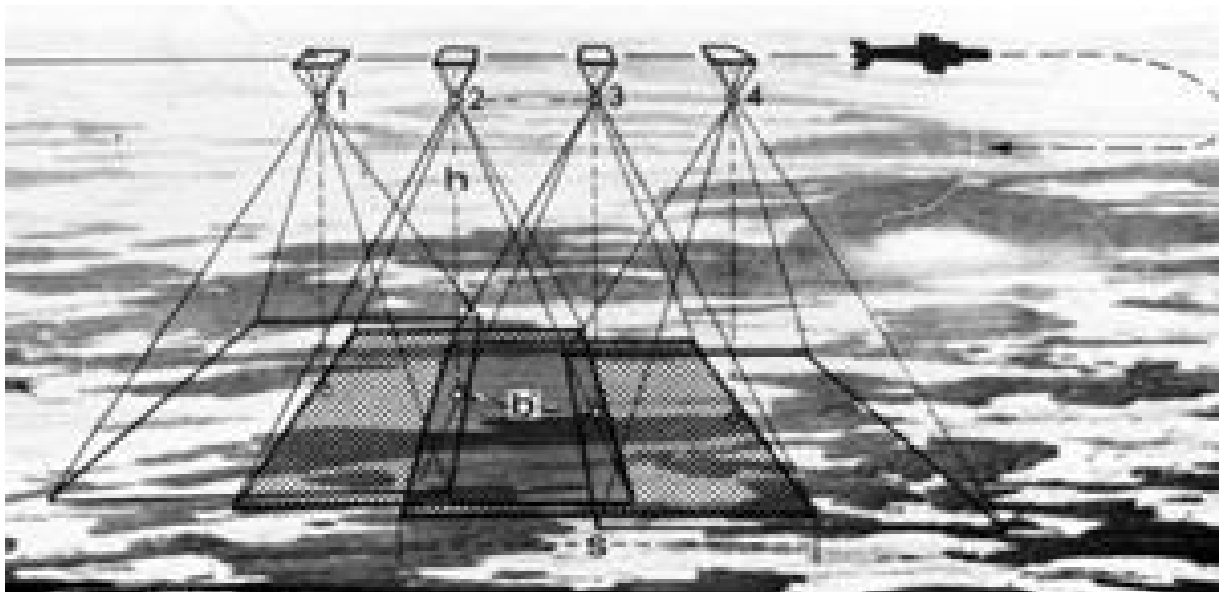


✓ Acquisition de données en photogrammétrie aérienne

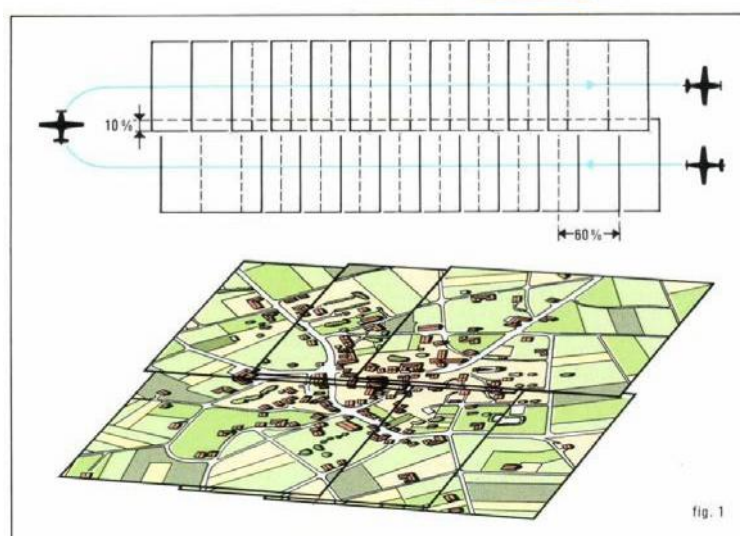
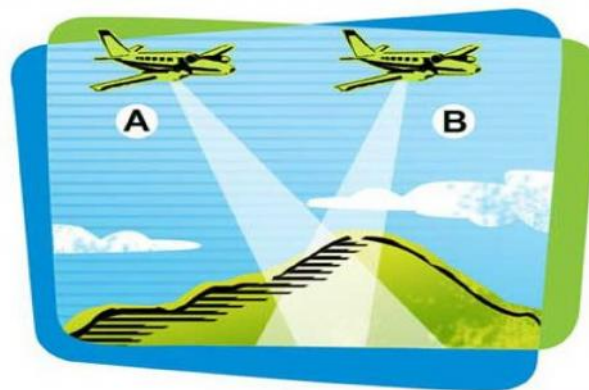
un avion équipé d'une chambre de prise de vues vole au-dessus d'une région, de façon qu'une partie du terrain figure sur deux clichés correspondant à deux positions différentes de l'avion. Cet avion est équipé d'un GPS qui donne les positions de l'avion tout au long de la prise de vue et d'une station inertielle pour corriger l'orientation de l'avion pendant son vol.



Si on observe simultanément un cliché avec un œil et le second avec l'autre œil grâce à un outil optique approprié (stéréoscope à miroirs, appareil de restitution, ordinateur équipé de lunettes spéciales, etc.), on voit en relief la zone de terrain vues sur les deux images. La vision humaine permet en effet de voir en relief dans une large gamme de dispositions relatives de ces deux images. Mais si nous disposons ces dernières dans une position relative exactement semblable à celle qu'elles avaient au moment de la prise de vue, alors l'image stéréoscopique observée est une exacte homothétie du terrain réel photographié.

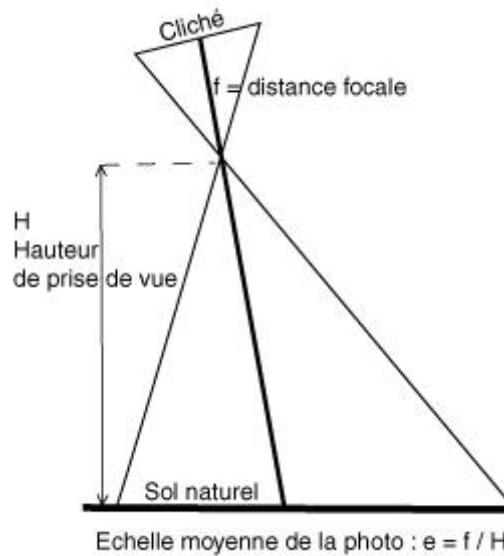


L'avion effectue un balayage de la zone suivant des lignes de vol bien définies de façon longitudinale et transversale de façon à ce qu'il y est entre chaque deux prises de vue de terrain une zone de recouvrement qui permet de créer le relief en 3D:



✓ Relation entre l'échelle d'une photographie et des propriétés de la prise de vue

Soit E l'échelle d'une photographie prise par un avion survolant le terrain avec une hauteur H et dont la caméra de prise de vue est caractérisée par une focale f .



L'échelle de la photographie est exprimée par :

$$\frac{1}{E} = \frac{f}{H}$$

Cette équation est correcte si la photographie est prise sur un terrain parfaitement plat, mais si le terrain est accidenté l'échelle en un point A est différente de celle au point B :

$$\frac{1}{E_A} = \frac{f}{H} \quad \text{ET} \quad \frac{1}{E_B} = \frac{f}{H - h_B}$$

Si $h_A < h_B$ ALORS $\frac{1}{E_A} < \frac{1}{E_B}$

AVEC h_B l'altitude au point B

Pour l'échelle de la restitution qui sera issue de cette prise de vue, la relation avec l'échelle de la prise de vue est en général :

$$E_R = 44 * E$$

P

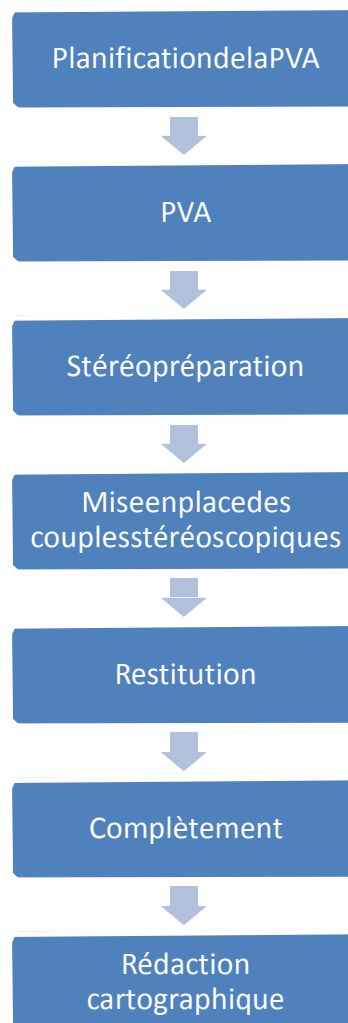
AVEC E_R facteur d'échelle de la restitution et E_P facteur d'échelle de la prise de vue.

✓ Éléments pour la planification d'une mission de prise de vue (PVA)

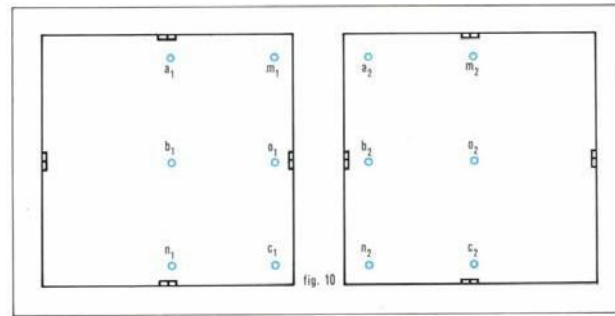
Avant de démarrer une mission de prise de vue, plusieurs paramètres sont à calculer pour être sûr de mener une bonne PVA afin de couvrir tout le territoire en question:

- * La hauteur de la prise de vue: Connaissant l'échelle de la restitution voulue, on décide sur la hauteur de la prise de vue.
- * Distance entre deux prises de vues (base): c'est le déplacement sur l'alignement de vol de l'avion pour prendre le cliché suivant.
- * Le nombre de photos par ligne de vol.
- * L'espacement entre deux lignes de vols successives.
- * Le nombre de lignes de vol.
- * Le nombre total de photos pour couvrir le territoire

✓ Processus de photogrammétrie



- Stéréopréparation: est une opération d'équipement des photographies par des points de contrôle connus en coordonnées terrain pour pouvoir rattacher le projet restitué au système de coordonnées terrain.

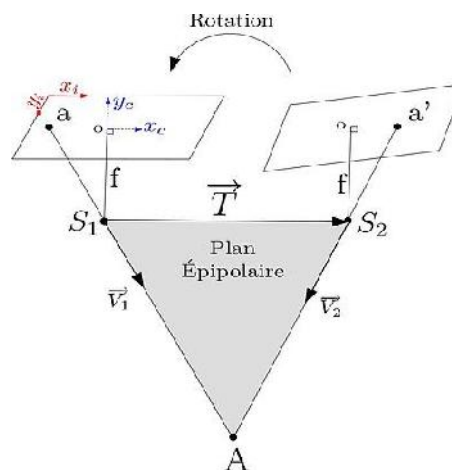


- Mise en place des couples stéréoscopiques: est une opération d'orientation des couples de photos prises de façon successive par l'avion dans les mêmes dispositions de leur prise de vue afin d'établir l'échelle, la position et l'orientation du modèle 3D (donné par le couple) en relation avec le système de coordonnées terrain.

On distingue:

- * l'orientation interne: qui permet de remettre chaque photo du couple comme il était posé sur la caméra.

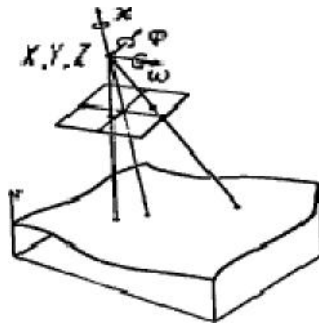
- * l'orientation relative: qui permet de remettre les deux photos ensemble comme elles étaient prises l'une par rapport à l'autre.





Orientation du couple stéréoscopique

* l'orientation absolue: qui permet de remettre le modèle en entier vers l'échelle, la position et l'orientation du terrain.



-Restitution: détermination et représentation en 3D d'un objet à partir de photographies stéréoscopiques obtenues à l'aide d'une chambre métrique (caméra).



- Complètement : est une sortie terrain pour compléter la restitution en ajoutant la toponymie, corriger les détails douteux...

- Rédaction cartographique : édition du plan en ajoutant un titre, un carroyage, un cartouche...



✓ Appareillage de restitution

Les appareils de restitution photogrammétrique ont évolué avec l'ère informatique. Les premiers appareils de traitement photogrammétrique étaient des comparateurs (mono ou stéréo) analogiques avec un système optico-mécanique qui mesure les coordonnées des points sur le couple stéréo. Ensuite, et avec l'évolution de la technologie, viennent les appareils analytiques qui sont des comparateurs analogiques couplés avec des unités de calcul et de dessin. De nos jours, les appareils utilisent des stations numériques qui sont des ordinateurs équipés de logiciels de traitement numérique des données avec des algorithmes avancés de calculs de coordonnées.

	Appareil analogique	Appareil analytique	SPN: Station de photogrammétrie numérique
Support	Conventionnel	Conventionnel	Numérique
Appareillage	Optico-mécanique	Analytique = Optico-mécanique + unité de calcul et de dessin	Station numérique
Restitution	Analogique sur calque	Numérique	Numérique
Produits dérivés	-----	-----	MNT, Orthophotos, Mosaïque



Appareil analogique



Appareil analytique



Station de photogrammétrie numérique (SPN)

✓ **Produits dérivés de la photogrammétrie**

En plus de la restitution qui donne des plans en 3D, la photogrammétrie numérique permet de produire :

*** des ortho photographies :** sont des images aériennes de la surface terrestre rectifiées géométriquement (c'est-à-dire corrigées de toutes les distorsions de lentille et de l'effet d'inclinaison du relief) et égalisées radiométriquement (c'est-à-dire qu'elles ont subi un traitement des valeurs radiométriques de leurs pixels afin d'avoir un contraste homogène).



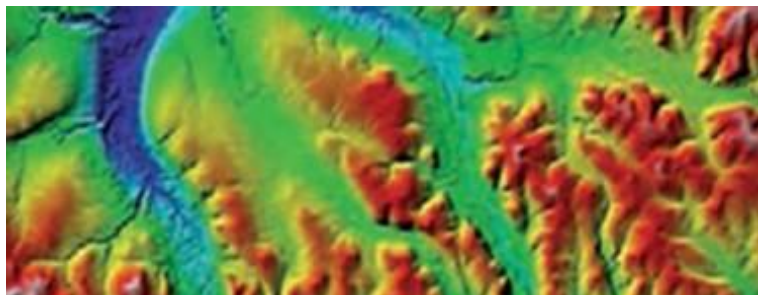
Orthophotographie

*** des mosaïques :** sont des orthophotos assemblées en dalles couvrant une zone de la Terre et qui sont géoréférencées dans n'importe quel système de coordonnées. Elles servent de fond cartographique dans les Systèmes d'information géographique.



Mosaïque

* **des Modèles numériques de terrain (MNT)**: qui sont des modèles en 3D sous forme de maillage décrivant le relief du terrain.



MNT