

Les principes physiques

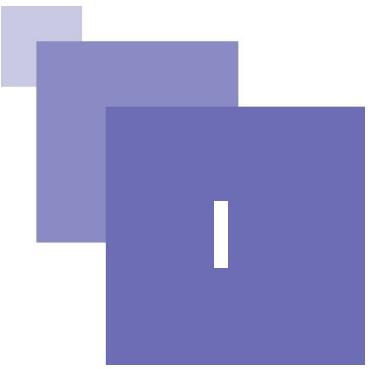
OLIVIER DE JOINVILLE

Table des matières

I - Principes	5
II - Généralités sur la localisation directe	7
A. Généralités sur la localisation directe.....	7
III - La mesure du temps (datation)	9
A. La datation des images.....	9
IV - Les orbites des satellites	11
A. Bonne connaissance de l'orbite du satellite.....	11
B. L'héliosynchronisme.....	12
C. Le phasage des orbites.....	13
D. Comment connaît-on l'orbite d'un satellite?.....	14
E. Effet des erreurs d'orbite (position).....	15
V - L'attitude du satellite	17
A. Calcul des angles d'attitude.....	17
1. Comment sont calculés les angles ?.....	17
2. Transmission des informations.....	17
3. Erreur de restitution d'attitude.....	17
B. Pointage du satellite.....	18
C. Effet des erreurs d'attitude (angles).....	19
D. Effet des erreurs d'attitude (vitesse angulaire).....	19
VI - Les directions de visée des pixels	21
A. Différents types de géométrie d'acquisition.....	21
1. Les scanners.....	21
2. Les détecteurs en ligne (Push Broom).....	22
3. Les détecteurs matriciels.....	23

B. Mesure des directions de visée.....	24
C. Dilatation des pas avec le dépointage.....	24
D. Calcul de la déformation d'un pixel en fonction du roulis.....	24
Conclusion	25

Principes



Définition

La géométrie des images repose sur l'ensemble des techniques permettant d'établir, d'améliorer et d'utiliser la localisation au sol des pixels de l'image.



Fondamental

La localisation des pixels d'une image peut s'effectuer de 2 manières différentes :

- directe : l'utilisateur est capable d'attribuer directement des coordonnées géographiques (cartographiques) à un pixel ;
- inverse : un point dont on connaît les coordonnées sur le terrain ou sur une carte va pouvoir être localisé dans l'image.

Ces correspondances peuvent être établies grâce à la modélisation (physique ou mathématique) de la géométrie de prise de vues ou également par une prise de points d'appui (points mesurés avec précision sur le terrain et identifiable sur l'image) ou de points homologues (ou de liaison, points permettant d'établir une correspondance entre les positions mesurées dans deux images d'un même détail au sol).



Complément

La géométrie des images sert pour les applications suivantes :

- géoréférencement d'une image ;
- superposition d'une image à une carte ou d'images entre elles ;
- mosaïque d'images ;
- spatiocartes, images satellite avec surcharges cartographiques ;
- stéréoscopie.

Généralités sur la localisation directe

A. Généralités sur la localisation directe



Définition

La localisation directe est obtenue par une modélisation physique du processus de prise de vues.

On intersecte la direction de visée du détecteur D avec la surface de la terre afin d'obtenir les coordonnées du point au sol P correspondant.

Il faut connaître 5 types de paramètres pour résoudre mathématiquement cette modélisation physique.

1. Temps d'acquisition du pixel : modèle de datation avec des horloges d'une très grande stabilité.
2. Position du satellite S à cet instant : connaissance parfaite de l'orbite.
3. Orientation du satellite à chaque instant d'acquisition : connaissance parfaite des angles d'orientation du satellite par rapport à un repère de référence d'altitude (gyroscope, senseurs stellaires).
4. Directions de visée de chaque détecteur par rapport au satellite : modèle des directions de visée, en effet à chaque détecteur correspond un angle de visée différent.
5. Connaissance de l'altitude du point visé pour éviter les déformations dues à la visée oblique des détecteurs.

La mesure du temps (datation)

A. La datation des images



Définition

La datation des mesures se fait grâce à l'horloge du satellite, cette horloge (à quartz) a une stabilité relative de 10^{-4} . Cette référence de temps est utilisée pour fournir des signaux de synchronisation aux instruments qui les enregistrent en même temps que les données image. De plus cette référence est rattachée au TAI (Temps Atomique International).

Une erreur de datation Δt de la ligne image se traduit par une erreur de translation longitudinale Δx (le long de la trace).

Les orbites des satellites

IV

Bonne connaissance de l'orbite du satellite	11
L'héliosynchronisme	12
Le phasage des orbites	13
Comment connaît-on l'orbite d'un satellite?	14
Effet des erreurs d'orbite (position)	15

A. Bonne connaissance de l'orbite du satellite

Introduction

Les orbites des satellites obéissent naturellement aux *lois de Kepler*¹.



Définition : Loi des orbites

Ce sont des coniques (ellipse) de foyer le centre de la terre.



Définition : Loi des aires

Le temps que va mettre le satellite pour aller de S_1 à S_2 est le même que celui pour aller de S_3 à S_4 , sachant que les aires TS_1S_2 et TS_3S_4 sont égales.



Définition : Loi des périodes

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\mu}$$

Avec :

- a le demi grand axe de la conique (soit la distance entre le satellite et le centre de la terre) ;
- T la période du mouvement ;
- μ la constante de gravitation terrestre ($398\ 600\ km^3/s^2$).

La période, l'altitude et la vitesse du satellite sont donc liées.

Pour des satellites d'observation de la terre :

- orbites basses $< 1\ 200\ km$, plutôt de l'ordre de $800\ km$;
- périodes comprises entre 90 et 110 minutes ;
- vitesse de l'ordre de $7\ km/s$.

En plus de la force de gravitation, le satellite est soumis à diverses forces :

1 - <http://phil.ae.free.fr/astro/lois/kepler.html>

- électromagnétiques ;
- frottements atmosphériques ;
- pression de radiation ;
- effet secondaire de marée ;
- forces de Coriolis.

Elles sont très faibles par rapport à la force de gravitation (jusqu'à 10^{-10}).

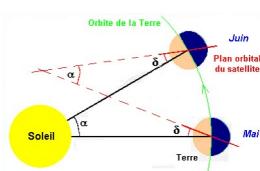
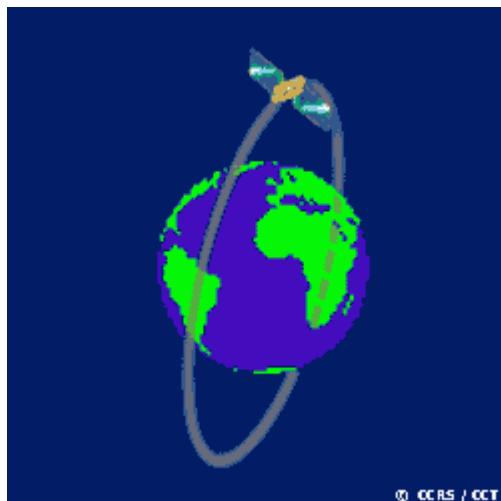
B. L'héliosynchronisme



Rappel

L'héliosynchronisme décrit le fait que le plan d'orbite du satellite tourne à la même vitesse que la terre autour du soleil. Grâce à cette propriété le satellite va passer à la même heure solaire locale pour une même latitude, par exemple SPOT passe à 10h30 à la latitude de Bordeaux (45°).

La possibilité de voir de manière répétitive certaines régions sous des conditions d'éclairement constantes est un avantage indéniable en télédétection.



Mais comment est-ce possible?

L'héliosynchronisme est possible grâce au fait que la terre n'est pas une sphère parfaite. En effet, elle est légèrement aplatie aux pôles (le diamètre de la terre fait 21 km de plus sur une coupe équatoriale par rapport à une coupe polaire).

L'aplatissement de la surface équipotentielle gravitationnelle au niveau du satellite à défilement produit une composante d'accélération gravitationnelle \vec{g} en direction de l'équateur.

Cette composante d'accélération provoque une perturbation (appelée précession de l'orbite) autour de l'axe polaire plutôt qu'un changement de l'angle d'inclinaison i .

C'est cette perturbation qui va engendrer une rotation de l'axe de l'orbite du satellite à la même vitesse angulaire que la vitesse apparente de rotation du soleil



en une journée au cours de l'année (cf. ci-après).

Cette vitesse apparente $d\Omega/dt$ vaut $0.98561228^\circ/\text{jour}$ ($\approx 360^\circ/365 \text{ jours}$).

On a :

$$\Omega = -\frac{3}{2} n \frac{R^2}{a^2} J_2 \frac{1}{(1-e^2)^2} \cos i = 0.98561228$$

$$\text{Avec } n = \frac{2\pi}{T}$$

où :

- T période de révolution du satellite ;
- R rayon de la terre ;
- a demi grand axe de l'ellipse ;
- J_2 terme du 2^e ordre du développement du potentiel terrestre ;
- e excentricité de l'orbite du satellite ;
- i inclinaison de l'orbite.

On voit donc que si l'orbite d'un satellite était rigoureusement polaire on aurait $\cos i=0$ et la vitesse angulaire du plan de l'orbite du satellite serait nulle par rapport à un référentiel inertiel (lié à une lointaine galaxie ou à un *quasar*²) ; on aurait alors des traces désordonnées sur le globe et en aucun cas l'héliosynchronisme ne serait possible.

Pour $i>90^\circ$ on a une précession dans le sens du mouvement apparent du soleil, pour $i<90^\circ$ la précession serait rétrograde par rapport au mouvement apparent du soleil.

Il faut bien réaliser que tout référentiel lié à la terre n'est pas inertiel du fait que la terre tourne autour du soleil.

Donc en cas d'orbite strictement polaire ($\cos i=0$) ou de terre parfaitement sphérique, on aurait des traces désordonnées sur le globe et en aucun cas l'héliosynchronisme ne serait possible.

C. Le phasage des orbites



Méthode : Problématique

Maintenant que nous savons comment un satellite tourne autour de la terre, **comment faire pour s'assurer qu'il va couvrir la totalité de la surface du globe terrestre en conjuguant le mouvement de rotation de la terre et le mouvement orbital du satellite?**

Si le nombre de révolutions par jour du satellite était entier, le satellite repasserait exactement à la verticale du même point au bout de 24 h, donc la totalité du globe ne serait pas couverte, à moins d'avoir une fauchée très large. Avec SPOT cela ne serait pas possible car sa fauchée de 117 kilomètres ne serait pas suffisante.

Le nombre d'orbites par jour est donc un nombre décimal, obtenu par la formule suivante :

$$n = \frac{24h}{T} = \frac{24h}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{(R_T+h)^2}}$$

2 - <http://fr.wikipedia.org/wiki/Quasar>

μ , constante de gravitation terrestre $398\ 600\ km^3/s^2$, R_T = rayon de la Terre, h = hauteur du satellite.

On a :

$$n = m + \frac{p}{q}$$

Avec p et q premiers entre eux et c'est q qui fournit le nombre de jours du cycle.

Pour SPOT $q=26$ jours et un cycle vaut 369 traces ($nq = mq + p = 26.14+5$).

D. Comment connaît-on l'orbite d'un satellite?

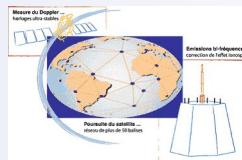


Fondamental

Essentiellement grâce à deux méthodes :

- à partir du passage du satellite au dessus de balises au sol : DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite), système comprenant une cinquantaine de balises fixes réparties sur toute la terre.

Grâce à *DORIS*³, on peut également avoir une information sur la gravité terrestre, en effet l'étude très fine de la déviation de trajectoire des satellites permet de faire ressortir des écarts de gravité sur le géoïde et donc une meilleure connaissance du géoïde.



- mesures de distances (laser) entre la station et le satellite à partir des stations de réceptions, mais c'est plutôt une application géodésique permettant par ces mesures d'avoir des infos pertinentes sur le géoïde à partir des orbites connues des satellites.

On calcule l'orbite du satellite de différentes manières :

- a priori : on extrapole l'orbite grâce à la connaissance de ses paramètres de localisation (précision une centaine de mètres) ;
- a posteriori : on restitue l'orbite en utilisant des mesures antérieures et postérieures à la prise de vues (précision < 10m, centimétrique avec DORIS) ;
- à bord (en temps réel) : utilisation en direct des données DORIS à bord (précision submétrique).

L'erreur de restitution d'orbite la plus importante est le long de la trace.

Perpendiculairement, elle est plus faible et elle est marginale en altitude.

E. Effet des erreurs d'orbite (position)

Erreurs sur la connaissance de la position du satellite

3 - http://www.jason.oceanobs.com/html/doris/principe_fr.html



Détecteurs en ligne

Détecteurs matriciels

Erreurs sur la connaissance de la vitesse du satellite

Détecteurs en ligne

Détecteurs matriciels

pas d'effets car images en un seul bloc



Rappel

L'attitude d'un satellite est son orientation par rapport à un repère de référence

L'attitude du satellite

V

Calcul des angles d'attitude	17
Pointage du satellite	18
Effet des erreurs d'attitude (angles)	19
Effet des erreurs d'attitude (vitesse angulaire)	19

A. Calcul des angles d'attitude

1. Comment sont calculés les angles ?

A l'aide de senseurs mesurant la position de sources externes connues (soleil, terre, étoiles) :

- des senseurs stellaires sont équipés de détecteurs CCD permettant de capter une ou plusieurs étoiles. Cette source est d'une excellente précision car elle est extrêmement éloignée et quasiment fixe ;
- des senseurs gyroscopiques mesurant des variations de vitesse de rotation inertielle, leur mesure est très précise à court terme mais peut dériver dans le temps.

2. Transmission des informations

Une fois les angles mesurés (cf. section Mesure des directions de visée), ils sont transmis vers les stations de réception pour connaissance a posteriori de l'attitude. On peut noter que les mesures gyroscopiques sont transmises à haute fréquence (32 Hz) et que les mesures des senseurs stellaires le sont à plus faible fréquence (1Hz). La fréquence de 32 Hz permet de détecter la majeure partie des mouvements angulaires du satellite. Il existe cependant des microvibrations à très haute fréquence mais d'amplitude très faible.

3. Erreur de restitution d'attitude

~ 0,3 mrad sur SPOT 4.

~ 0,02 mrad sur SPOT 5.

L'amélioration pour SPOT 5 provient essentiellement de la qualité des senseurs stellaires.

Comment sont effectués les manœuvres des satellites ?

Ils sont effectués à l'aide d'actuateurs :

- à tuyères (et donc utilisant du kérósène) pour les manœuvres d'orbites lourdes (changement d'orbite) ;
- à toupies ou à gyroscopes pour les manœuvres plus fines (changement d'orientation en attitude).

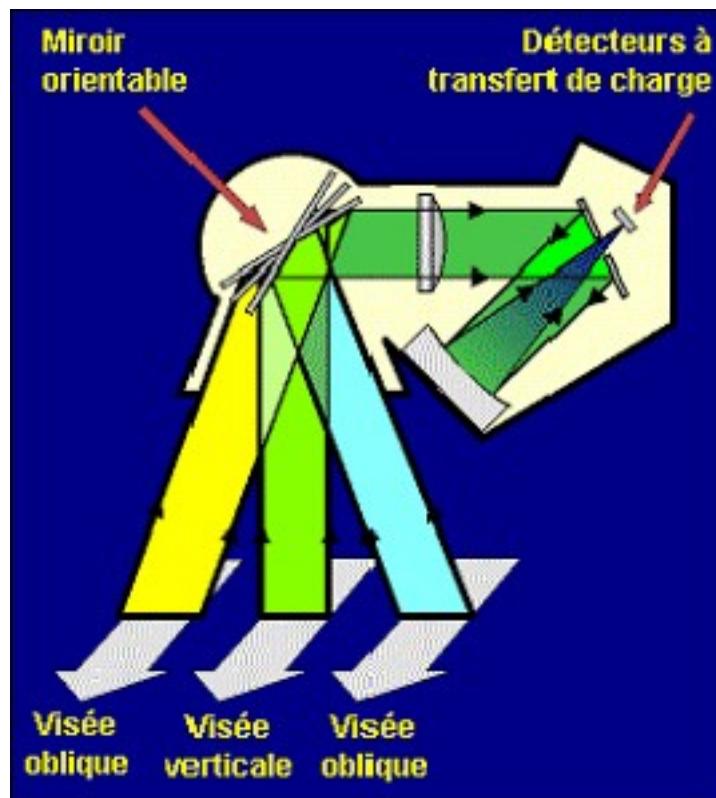
B. Pointage du satellite

Introduction

Il s'agit de pointer les appareils de mesure vers les sites à observer.

3 types de pointage possible :

- pointage au nadir (ou géocentrique) : cas des détecteurs à champ large (Végétation, Polder) ;
- déplacement du satellite complet : cas des capteurs à haute résolution et champ étroit (Ikonos, Quickbird, Satellites militaires, Pleiades) ;
- pointage par miroir : rotation d'un miroir de visée, cas des satellites SPOT (instruments HRV, HRVIR et HRG).



C. Effet des erreurs d'attitude (angles)

Ce sont des déformations globales

DéTECTEURS EN LIGNE

DéTECTEURS MATRICIELS

D. EFFET DES ERREURS D'ATTITUDE (VITESSE ANGULAIRE)

DéTECTEURS EN LIGNE (déformations internes)

DéTECTEURS MATRICIELS

Pas d'effet du fait de la rigidité de l'image.

Les directions de visée des pixels

VI

Différents types de géométrie d'acquisition	21
Mesure des directions de visée	24
Dilatation des pas avec le dépointage	24
Calcul de la déformation d'un pixel en fonction du roulis	24

A. Différents types de géométrie d'acquisition

1. Les scanners

- Les pixels sont acquis les uns après les autres.
- Le balayage des lignes est acquis de deux manières possibles :
 - rotation complète du satellite : Météosat ;
 - rotation d'un miroir : Landsat TM, AVHRR.

Le balayage des colonnes est également acquis de deux manières possibles :

- rotation d'un miroir : Météosat (le satellite étant géostationnaire, il n'a pas de mouvements propres par rapport à la terre) ;
- avancée du satellite : Landsat TM ancienne génération.

Avantages

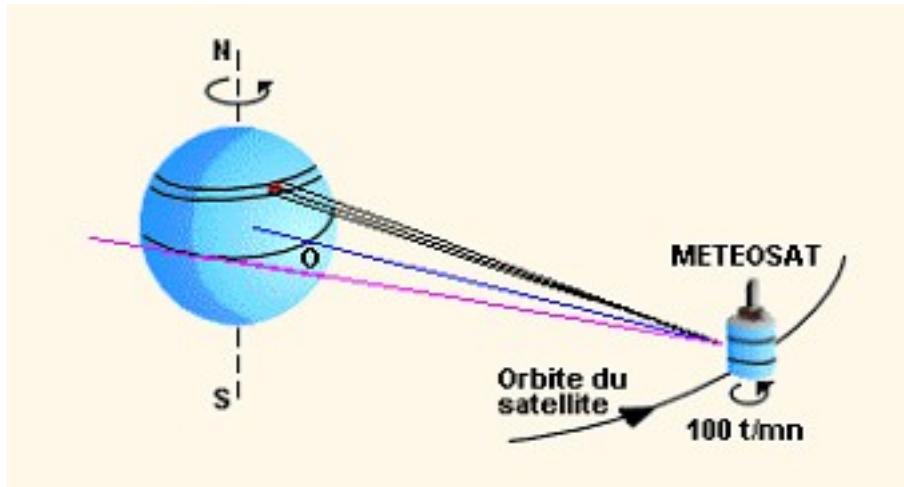
- Un seul détecteur, donc une radiométrie homogène

Inconvénients

- Perturbations géométriques
- Limites de temps d'intégration et donc limites de résolution spatiale

Géométrie d'acquisition

Géométrie conique par pixel



2. Les détecteurs en ligne (Push Broom)

- Les lignes sont acquises simultanément par des détecteurs alignés.
- Les colonnes sont acquises par l'avancée du satellite.

Avantages

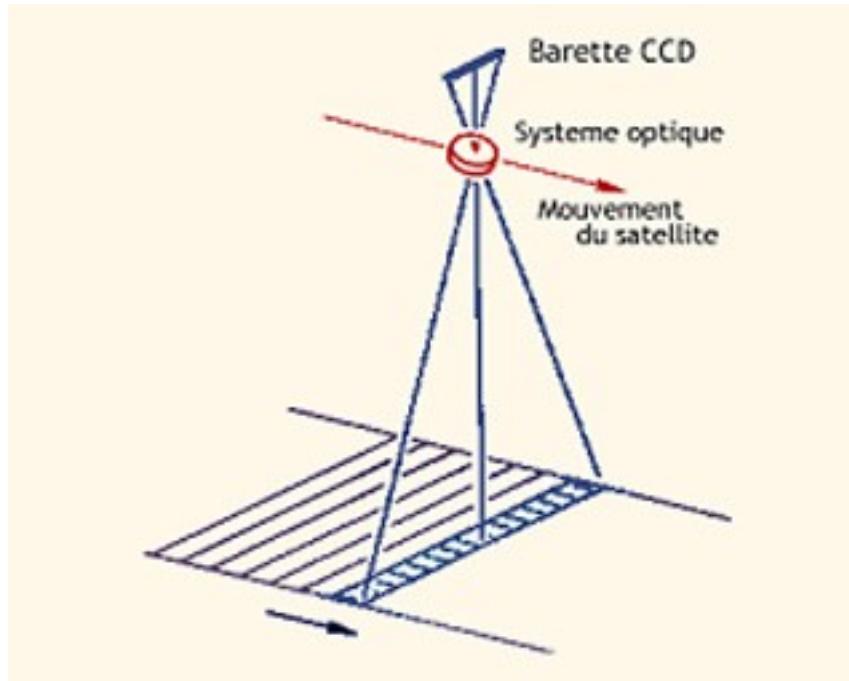
- Simplicité et souplesse d'emploi
- Possibilité d'avoir des bandes larges (24000 pixels sur SPOT5)
- Bonne maîtrise de la géométrie
- Utilisation du mouvement orbital du satellite (bien connu)

Inconvénients

- Complexité du plan focal
- Problème d'égalisation radiométrique

Géométrie d'acquisition

Géométrie conique par ligne, acquisition séquentielle de chaque ligne, formation des colonnes par avancée du satellite



3. Les détecteurs matriciels

Acquisition de type capteur aérien

Avantages

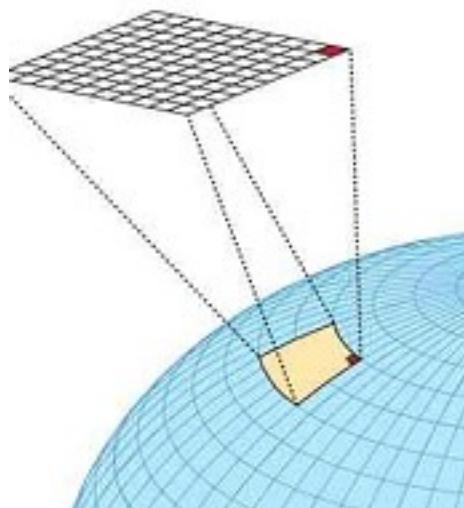
- Qualité géométrique
- Nombre de prises de vue accessibles

Inconvénients

- Beaucoup de détecteurs , donc problèmes d'homogénéité
- Mouvement orbital du vecteur (ralenti sur image en cas de haute résolution)

Géométrie d'acquisition

Géométrie conique, acquisition instantanée de l'image



B. Mesure des directions de visée



Définition

Elles sont mesurées dans un repère instrument et sont :

- étalonnées au sol par saisie de points d'appui au sol :
 - points mesurés sur une carte,
 - points mesurés sur le terrain ;
- réestimées en vol.

Une fois la direction de visée connue, il faut également connaître l'altitude du point considéré pour éviter d'encaisser une erreur de parallaxe (ΔX).

Pour cela on doit disposer d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain : grille donnant pour chaque noeud son altitude correspondante), l'altitude du point visé est alors obtenue par interpolation à partir du MNT.

C. Dilatation des pas avec le dépointage

Dans le cas d'un capteur à barrettes avec une fauchée importante, les pixels sont déformés sur les bords de la bande longitudinalement et latéralement. Le graphique ci-dessous illustre ce propos pour un angle de roulis variant de 0 à 55°.

D. Calcul de la déformation d'un pixel en fonction du roulis

Calculer la longueur et la largeur d'un pixel au sol pour un satellite dont le dépointage en roulis est de 50°, l'angle de vue d'un détecteur de 0,0877 mrad et la hauteur de vol 900 km ?

Conclusion

La géométrie des images consiste à affecter une localisation géographique (ou cartographique) à chaque pixel de cette image (localisation directe). Inversement, il est possible de déterminer quel pixel de l'image correspond à quel détail du terrain (localisation inverse).

Il y a donc deux grandes phases dans la mise en géométrie des images :

- calcul de la direction de visée du détecteur :
 - datation ;
 - orbite du satellite ;
 - attitude du satellite ;
- intersection de cette direction de visée avec le sol en tenant compte de l'altitude du point visé.

La phase suivante est la mise en géométrie d'une image.

Elle s'effectue à travers les deux grandes phases suivantes :

- la modélisation ;
- la rectification.

Ces deux phases constituent la suite de ce cours.