

# INDUSTRIALISATION DE LOGICIELS DE CARTOGRAPHIE SPATIALE SPATIOTRIANGULATION DE BLOCS D'IMAGES "DELTA", OU LA PHOTOGRAMMÉTRIE APPLI- QUÉE AUX IMAGES SATELLITES

Par V. RODRIGUEZ - Géo Design SA - 31675 Labège

## RÉSUMÉ

*L'apparition des prises de vues embarquées (Nadar, 1858) fût à l'origine d'incessantes mutations chez l'homme dans sa manière d'appréhender l'espace terrestre dans lequel il évolue. Les processus d'élaboration d'information géographique sont désormais et de manière quasi-unanime basés sur l'exploitation d'une imagerie -aujourd'hui numérique- obtenue par ce mode d'acquisition infiniment efficace.*

*L'incontournable accroissement du niveau de qualité et d'opérationnalité requis par l'utilisation méthodique de cette source de données nécessite une prise en compte de plus en plus rigoureuse des aspects géométriques qui lui sont inhérents.*

*L'Institut Géographique National (IGN) France, organisme à la pointe de la recherche et de la mise en application en matière de photogrammétrie, dispose aujourd'hui d'une chaîne de traitement permettant une parfaite exploitation cartographique des prises de vues satellites. Ceci grâce à l'introduction d'une technique nouvelle : la spatiotriangulation, application photogrammétrique dérivée de l'aérottriangulation utilisée dans le cadre de l'exploitation des couvertures photographiques aériennes, qui permet de s'affranchir au maximum des incohérences géométriques induites par le fractionnement en plusieurs vues de la représentation image d'une zone géographique.*

*La société Géo Design SA, engagée avec l'IGN dans une logique de transfert vers l'industrie du savoir-faire méthodologique acquis dans divers domaines, réalise et commercialisera d'ici quelques mois un outil logiciel standard, intégrable et opérationnel, destiné à incorporer au sein des divers systèmes de traitement d'information, actuels et à venir, un métier spécifique et hautement spécialisé : débarrasser l'imagerie numérique de ses défauts géométriques et rendre ainsi son utilisation géographique équivalente à celle d'un document cartographique géométriquement parfait.*

## ◆ L'IMAGERIE ET SES COMPOSANTES

### ■ L'objet observé : la Terre.

L'imagerie est une technique très ancienne permettant à l'homme de garder une trace concrète, figée, sur le support de son choix, d'un objet réel généralement en mouvement dans l'espace ou le temps.

En télédétection, l'imagerie est utilisée afin de conserver une représentation de la surface terrestre, objet soumis à de perpétuelles transformations, d'origines naturelles ou liées à l'activité humaine, plus ou moins rapides et donc observables dans le temps avec des périodicités plus ou moins grandes (urbanisation, agriculture, catastrophes naturelles, ...).

Afin d'étudier a posteriori et avec une extrême précision ces phénomènes, les images concernées doivent avoir comme qualité première la fidélité de représentation, tant sur le plan de la lumière (respect des couleurs, des intensités) que sur le plan de la géométrie (respect des proportions, surfaces et distances, mémoire de la localisation absolue ou relative).

### ■ La fidélité de représentation ou qualité géométrique image

Dans le domaine de la géométrie, fidélité de la représentation signifie pour l'utilisateur final possibilité de déduire pour tout objet observé et à partir de caractéristiques géométriques mesurées dans l'image :

- une localisation absolue à la surface de la Terre,
- une localisation relative par rapport à d'autres objets,
- toute autre caractéristique géométrique associée (i.e. ses dimensions),

et ce par la mise en oeuvre de processus plus ou moins complexes nécessitant des moyens plus ou moins lourds.

### ■ La séquence des processus à prendre en compte

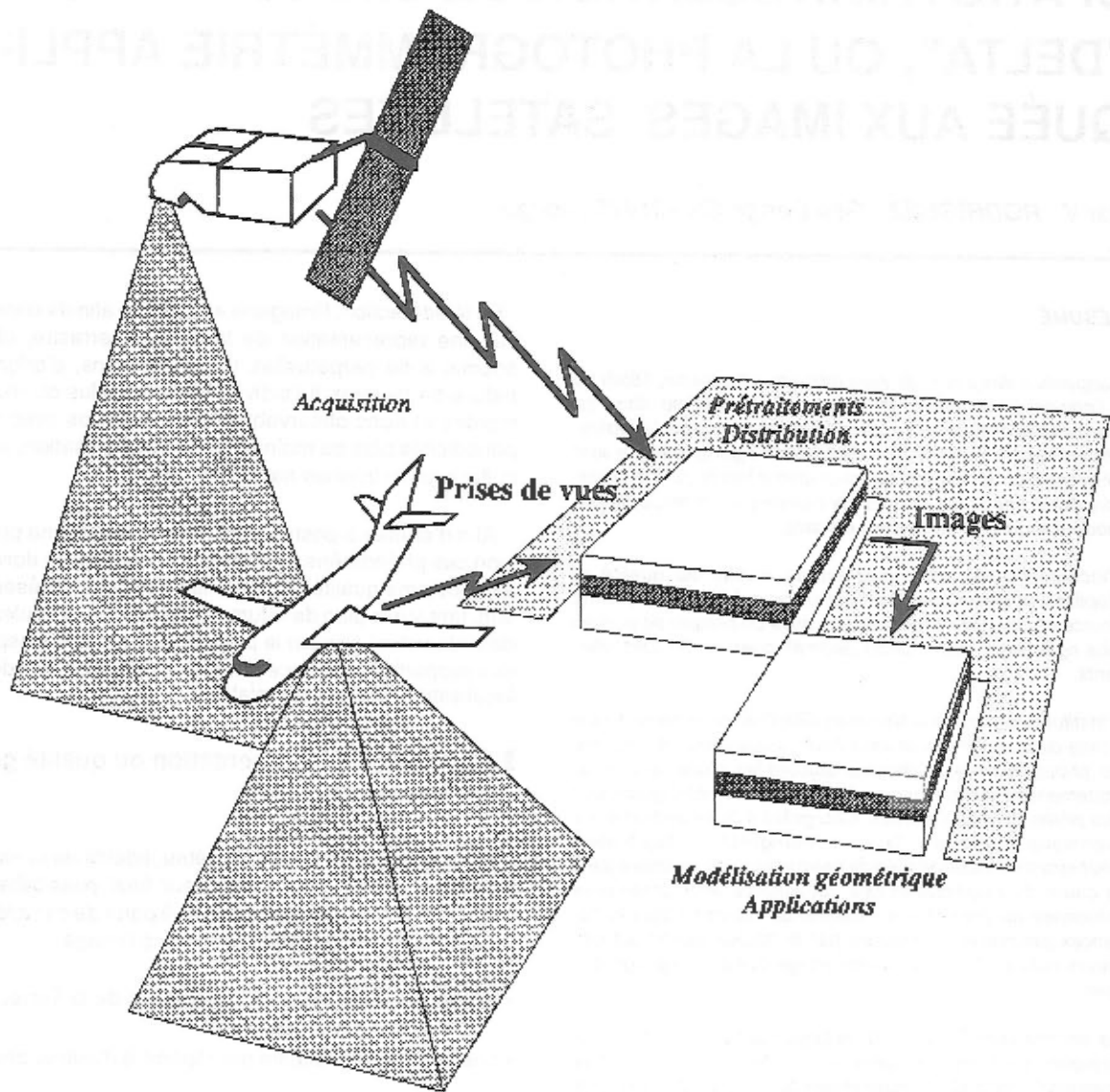
Il est certain que la qualité géométrique d'une image est liée à celle du capteur utilisé.

Cependant, la fidélité de représentation réside également dans la qualité des moyens mis en oeuvre par ailleurs et influant plus ou moins directement sur la qualité du résultat final visé par l'utilisateur de l'image :

- moyens mis en oeuvre dans le cadre du système global

de prise de vues (vecteur, orbitographie, transmission des données, prétraitements systématiques, ...),

• moyens mis en oeuvre par l'utilisateur (modélisation géométrique de la prise de vues, déformation des images, ...).



Il apparaît donc indispensable, dès lors qu'une qualité cartographique est visée, que l'utilisateur soit en mesure de réaliser une modélisation géométrique globale de l'ensemble des processus et de leur influence sur la représentation image.

Cette étape nécessite la prise en compte d'informations extérieures à l'image-même :

- informations internes au système imageur ou endogènes (télémétrie auxiliaire, données annexes distribuées avec l'image),
- informations externes au système imageur ou exogènes (éléments de recalage géométrique),

qui devront reproduire au mieux les phénomènes susceptibles d'avoir perturbé la géométrie de l'image, depuis le moment de son enregistrement jusqu'au moment de son utilisation.

## ◆ LA TRIANGULATION SPATIALE DE BLOCS D'IMAGES

### ■ Photogrammétrie, triangulation, spatio-triangulation

La photogrammétrie consiste en la mesure des caractéristiques géométriques d'un objet (métrique) sur une représentation image de cet objet (photogramme). L'in-

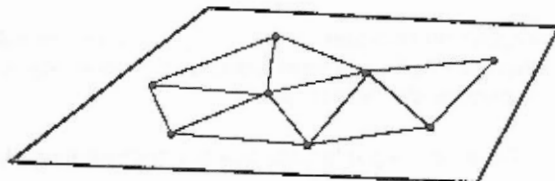
térêt d'utiliser pour ce faire une image plutôt que de mesurer l'objet lui-même est évident dès lors que la mesure ne peut être directement appliquée à l'objet lui-même.

Les techniques photogrammétriques permettent depuis longtemps l'établissement de cartes topographiques ou de plans architecturaux à partir de mesures réalisées sur des images photographiques représentant l'objet considéré (le terrain ou les superstructures).

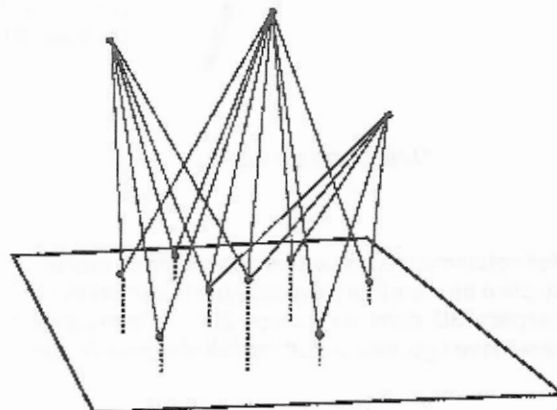
La triangulation est la technique de détermination de la position (inconnue) d'un point (l'un des sommets du triangle) à partir de visées angulaires issues des 2

autres sommets, née de l'application de principes géométriques élémentaires connus depuis l'antiquité. Cette technique a été initialement utilisée dans un espace à 2 dimensions pour résoudre des problèmes de localisation sur une surface, la Terre, par la géodésie et la cartographie dont elle est et restera une des techniques fondamentales.

Cette même technique est également devenue très vite la technique fondamentale de la photogrammétrie, grâce à son application dans un espace à 3 dimensions, le plus vieil appareil de photogrammétrie incorporant cette technique ayant été le premier carreau doué d'une vision stéréoscopique. Cette technique est appelée spatiotriangulation.



Triangulation 2D



Triangulation 3D

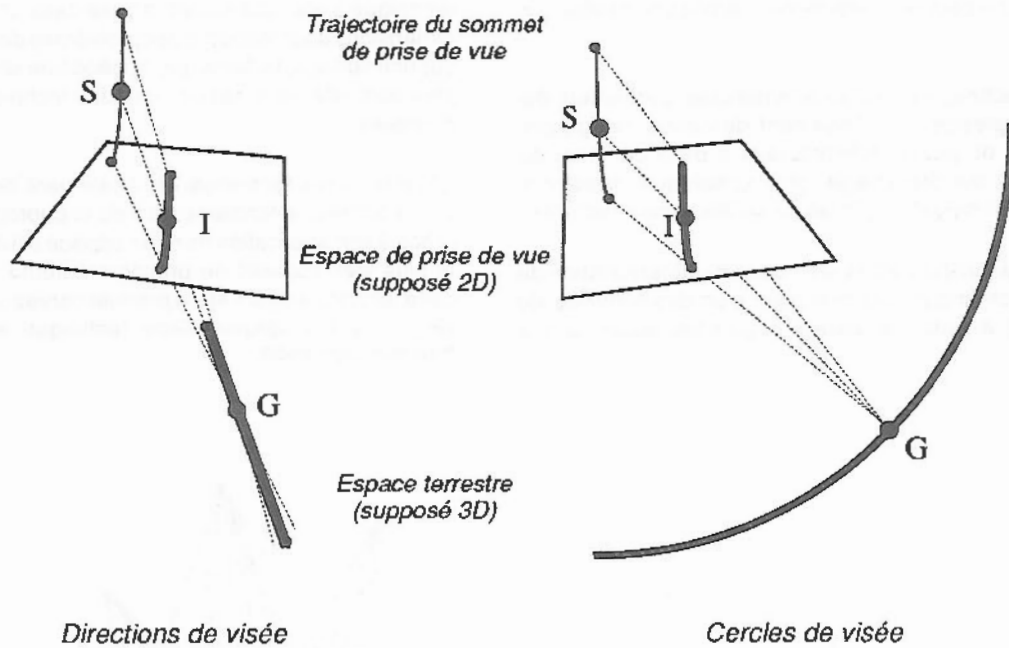
Les mécanismes intervenant dans ce cas peuvent être regroupés en 3 phases distinctes :

- *la prise de vues* : un certain nombre d'images sont obtenues comme autant de représentations (2D) de l'objet ou d'une partie de l'objet (3D).
- *la modélisation* : un modèle géométrique de prise de vues est élaboré pour chaque image, explicitant la « projection » de l'espace objet (3D) dans l'espace image (2D).
- *la restitution* : un modèle géométrique virtuel (3D) de l'objet est reconstruit à partir des modèles de prise de vues et permet de déterminer toute nouvelle représentation de l'objet observé. La photogrammétrie classique fait intervenir des prises de vues photographiques instantanées à géométrie conique.

## II Modélisation géométrique de prises de vues, modélisation physique

La modélisation géométrique d'une prise de vues est l'étape fondamentale de la spatiotriangulation, car elle conditionne la qualité des résultats obtenus par la suite.

Elle consiste à expliciter une correspondance mathématique entre un système de coordonnées attaché à la prise de vues (système de coordonnées image ou dépendant du processus d'enregistrement image) et un système de coordonnées terrestre, sous une formulation pouvant varier d'un type de prise de vues à l'autre mais faisant toujours intervenir un concept de visée associé au pixel image - l'ensemble des points de l'espace terrestre ayant pour homologue ce pixel dans l'espace image - pouvant correspondre selon les cas à une droite (capteurs optiques) ou un cercle (capteurs actifs/passifs).



Du fait notamment du caractère non bijectif du processus de prise de vues (qui s'explique par la compression d'un espace 3D dans un espace 2D), la formulation mathématique rigoureuse d'un modèle de prise de vue est :

G	appartient à	$M_d(I)$	(1)
I	appartient à	$M_i(G)$	(2)

avec G point appartenant à l'espace terrestre  
 I image du point G dans l'espace de prise de vues  
 $M_d(I)$  ensemble des points dont I est l'image dans l'espace terrestre  
 $M_i(G)$  ensemble des points image de G dans l'espace de prise de vues

Cette formulation fait apparaître les 2 formes d'expression du modèle géométrique de prise de vues, appelées forme directe ( $M_d$ ) et forme inverse ( $M_i$ ).

On note qu'aucune de ces 2 relations n'est à proprement parler une application, puisqu'un point terrain peut avoir plusieurs images dans l'espace de prise de vues et réciproquement. Cependant, la phase de restitution tend à redonner un caractère bijectif global aux transformations  $M_d$  et  $M_i$  dès lors que :

- l'intersection des localisations  $M_{d1}(I_1), M_{d2}(I_2), \dots, M_{dn}(I_n)$  est réduite à un point pour un ensemble de points images homologues  $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$  pris dans différents espaces de prise de vues associés respectivement aux modèles  $M_{d1}, M_{d2}, \dots, M_{dn}$  ; c'est le principe de la stéréoscopie,
- l'intersection des localisations  $M_d(I_1), M_d(I_2), \dots, M_d(I_n)$  est réduite à un point pour un ensemble de points

images homologues  $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$  pris dans un même espace de prise de vues associé au modèle  $M_d$  ; c'est le principe de l'holoscopie.

On suppose par la suite que la transformation  $M_i$  est une application.

Dès lors qu'une précision cartographique est visée concernant la localisation dans l'espace de points restitués à partir de vues modélisées, le recours à une formulation physique du modèle géométrique est nécessaire pour rendre compte parfaitement du processus de prise de vues. Ceci a par ailleurs l'avantage de sélectionner la description physique qui paraît a priori la plus adaptée sur un plan déterministe au processus concerné.

La formulation physique s'appuie alors sur des paramètres, connus ou inconnus, associés au capteur ou au vecteur, et décrivant les conditions de prise de vues.

G	appartient à	$M_d(I, E(I))$	(3)
I	=	$M_i(G, E(G))$	(4)

avec E(I) ensemble des conditions de prise de vues associées à I  
 E(G) ensemble des conditions de prise de vues associées à G

Ceci met en évidence une difficulté effective à l'application de la formule (4) dès qu'une formulation physique du modèle intervient, puisqu'elle fait intervenir des conditions de prise de vues dépendant du point G (conditions d'enregistrement à l'instant et au lieu du point G), et non directement du point I par rapport auquel elles peuvent être connues.

Le vecteur constitué par l'ensemble de ces paramètres -aussi appelés variables d'état- est appelé vecteur d'état du système. D'une manière générale, on appelle *état associé à un point l* la valeur du vecteur d'état notée  $E(l)$  ayant déterminé l'enregistrement du point l.

La détermination de la meilleure fonction d'état possible fait apparaître 2 préoccupations :

- chercher la meilleure formulation mathématique de la fonction d'état, que l'on désigne par le terme générique *modèle* ou *modèle d'état*,

- déterminer les paramètres inconnus -ou connus avec une précision jugée insuffisante- pouvant apparaître dans la formulation choisie de la fonction d'état, que l'on désigne par le terme *inconnues de modélisation*.

### ■ Amélioration de la connaissance

Relativement à cette démarche, un gain de qualité en matière de modélisation géométrique des images correspond à une amélioration de la connaissance de l'état des systèmes de prise de vues (connaissance a priori/ connaissance a posteriori).

La détermination des inconnues intervenant dans la formulation de la fonction d'état nécessite la prise en compte d'informations exogènes sous forme de mesures -*les observations*- prises en un certain nombre de lieux et supposées sensibles à l'écart entre un état estimé (valeurs estimées des variables d'état) et l'état réel.

Cette sensibilité peut être formulée de la manière suivante :

$$m(A) = H( E(A) - \hat{E}(A) ) \quad (5)$$

avec

- A lieu de mesure
- m(A) mesure réalisée au lieu A
- H sensibilité de la mesure par rapport à une variation d'état
- $\hat{E}$  valeur estimée du vecteur d'état E

Cette formulation est appelée équation de mesure ou équation d'observation. La fonction H est appelée fonction de mesure et dépend généralement du lieu de mesure A.

La formulation des équations d'observation est à la base du processus d'estimation ou de réestimation des inconnues de modélisation. Ceci implique quasi-systématiquement une linéarisation préalable de cette formulation, obtenue par exemple par différenciation au voisinage d'une solution approchée, l'équation (5) pouvant alors s'écrire :

$$m(A) = H(A) \cdot X \quad (6)$$

avec

- H(A) matrice de mesure
- X biais d'estimation sur les inconnues de modélisation

Les méthodes d'estimation utilisées sont en général :

- probabilistes, afin de tenir compte d'hypothèses sur les erreurs de mesure et la variance des inconnues,

- itératives, en raison notamment de la non-linéarité des équations d'observation.

Ces méthodes fournissent, outre une estimation des inconnues de modélisation, un certain nombre d'indicateurs forts intéressants parmi lesquels :

- variance et covariance constatée ou prévisible des inconnues de modélisation,

- variance et covariance constatée des erreurs de mesure,

- aptitude du processus à la convergence rapide, notamment en terme de gain sur la variance des inconnues en fonction de la variance et du lieu des mesures (la fonction de mesure met en évidence la sensibilité d'une inconnue par rapport au lieu de mesure).

### ■ Spatiotriangulation de bloc

Deux critères sont décisifs en termes de qualité de modélisation :

- la qualité de description relative du processus de prise de vues, garantissant la cohérence interne de la vue, donc une qualité de représentation a posteriori des formes et volumes de l'objet lors de la restitution,

- la qualité de description absolue du processus de prise de vues, garantissant sa localisation globale par rapport à l'espace terrestre, donc une qualité de relocalisation a posteriori des points de l'objet dans cet espace.

En théorie, ces 2 critères sont atteints simultanément. Cependant, du fait des imperfections géométriques non modélisées et imputables aux prises de vues (aberrations géométriques des optiques par exemple) d'une part et des erreurs inévitablement commises lors des observations associées aux mesures d'autre part, une optimisation de la qualité du modèle de prise de vue doit être réalisée en fonction d'un compromis recherché (cohérence interne et localisation absolue de l'objet restitué, évaluées localement ou de manière globale).

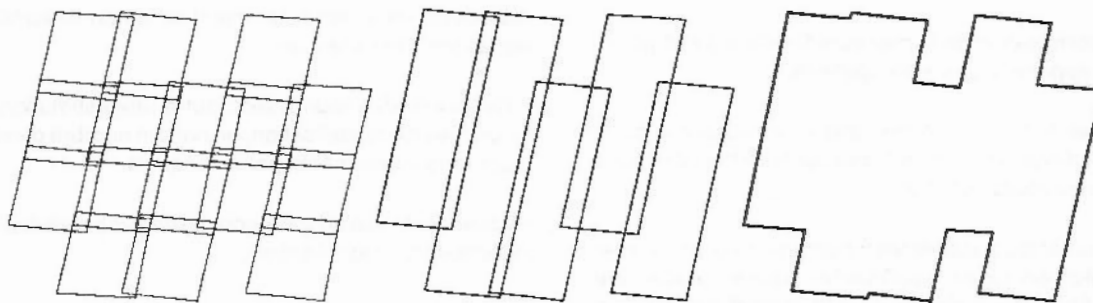
Lorsqu'un objet doit être restitué à partir de plusieurs prises de vues (objet contenu dans une prise de vues stéréoscopique ou objet restitué par tronçons car «à cheval» sur plusieurs prises de vues), une modélisation indépendante des différentes prises de vues concernées introduit un risque supplémentaire d'incohérence de localisation ou de conformité de l'objet restitué.

Il convient alors de réaliser une optimisation globale (ou compensation) des modèles au sein d'une modélisation simultanée des prises de vues, la garantie de cohérence étant d'autant plus forte que de nombreuses mesures «croisées» (lieux de mesure situés dans

une zone couverte par plusieurs images) sont introduites dans le processus de détermination des inconnues.

Les prises de vue modélisées simultanément constituent un «bloc» de modélisation, le terme de bloc

mettant en évidence la notion d'inter-cohérence géométrique des modèles obtenus. Le bloc correspond alors à l'unité de regroupement des prises de vues au sein de laquelle le meilleur compromis est recherché.



Vues

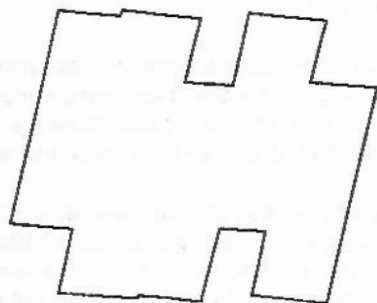
Prises de vues

Bloc de prises de vues

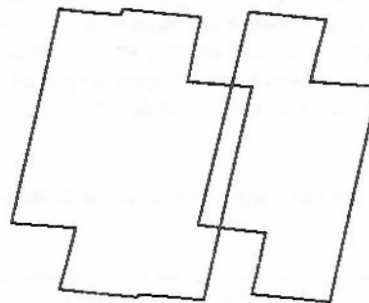
Mais il arrive que la taille d'un bloc devienne trop importante -un trop grand nombre de prises de vues sont modélisées simultanément du fait de la trop grande taille de l'objet à traiter relativement à la portion d'objet qu'une prise de vue peut couvrir- et entraîne une compensation excessive d'un ou plusieurs modèles expliquée par un effet de surmultiplication de compensations

imprécises subies par d'autres modèles.

Il est alors préférable de scinder le bloc concerné en plusieurs blocs de taille moindre, en tenant compte éventuellement des incompatibilités mises en évidence entre modèles.



Bloc de prises de vues



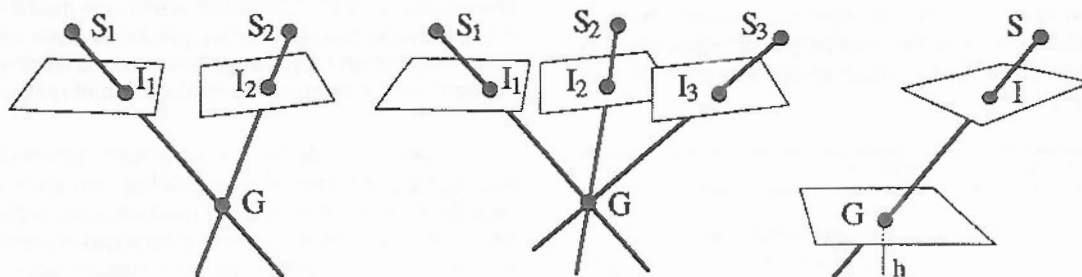
Scission de bloc

Le nombre et la taille des blocs sont fonctions de l'incapacité pour la modélisation de garantir une qualité de restitution donnée pour des zones ou régions plus ou moins étendues du terrain observé.

de vues stéréoscopiques, sa position dans l'espace de référence (3D).

Les modèles de prises de vue déterminés, la phase de restitution permet de recalculer pour tout point de l'objet observé, à partir de ses coordonnées dans un ensemble

Une extension de la notion de spatiotriangulation - impropre puisque n'étant pas basée sur le principe de la triangulation mais sur celui de l'intersection- concerne la restitution de la position d'un point à partir de l'observation sur une seule image combinée à la prise en compte d'un élément externe (i.e. l'altitude).



Spatiotriangulation

Intersection

## ◆ ENJEUX TECHNOLOGIQUES DU PROJET DELTA

### ■ L'application IGN à la prise de vue SPOT

L'Institut Géographique National est un des organismes majeurs participant à l'évolution des techniques dans le domaine de la photogrammétrie.

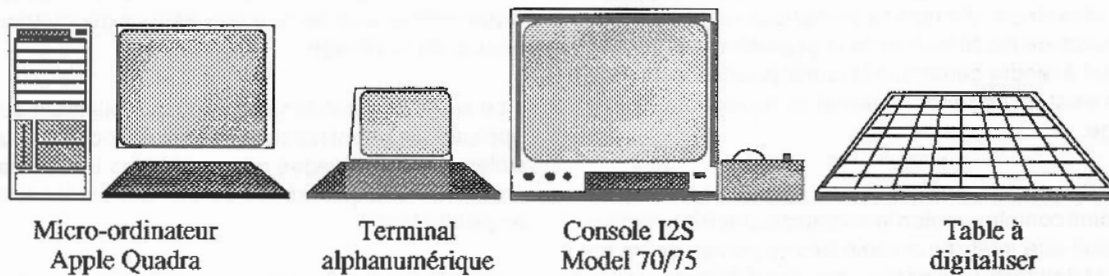
Dès 1978, l'IGN a mis en évidence la possibilité et l'intérêt d'appliquer la spatiotriangulation aux prises de vues SPOT dans un but cartographique.

Sur la base des outils opérationnels d'aérotriangulation destinés à l'exploitation des photographies aériennes puis utilisés également dans le cadre de relevés architecturaux, des études suivies de réalisations concrètes ont permis en 1992 de mettre en oeuvre à l'IGN Espace une chaîne de traitement opérationnelle permettant notamment une parfaite maîtrise de la cohérence cartographique des chantiers de spatio-cartes de très grande taille (à l'échelle d'un pays par exemple).

### Configuration matérielle

L'atelier complet, qui assure également la fonction de mesure des points d'appui sur images et cartes, est connecté au serveur de calculs et de données (cluster Vax 6400 + 4200). Il est constitué des sous-ensembles matériels suivants :

- un micro-ordinateur Apple Quadra, constituant le poste de contrôle et de gestion de l'atelier, sur lequel s'exécute l'ensemble de l'interface Homme-Machine (hors pointés image),
- un terminal alphanumérique, connecté au serveur, utilisé comme écran de suivi et de messagerie des procédures activées sur le cluster,
- une console image de type I2S Model 70/75, connectée au serveur, destinée aux affichages et pointés image,
- une table à digitaliser, connectée au serveur, destinée aux pointés carte des points d'appui.



IGN Espace - Configuration matérielle de l'atelier de spatiotriangulation

Cette configuration doit être très prochainement simplifiée, les opérations exécutées sur la console image (pointés image des éléments de recalage) étant transférées sur le micro-ordinateur.

#### Fonctionnalités logicielles

Le logiciel de spatiotriangulation est réparti entre le serveur (mesure des points d'appui, calculs des modèles de prise de vue) et le micro-ordinateur (interface Homme-Machine de suivi, de contrôle et de gestion des processus).

Il permet la prise en compte de prises de vues SPOT prétraitées au niveau 1A et intègre la notion de segments et bi-segments de prise de vue.

Les principaux sous-systèmes fonctionnels sont :

• un outil de suivi de chantier, assurant la gestion macroscopique des informations (blocs, segments, scè-

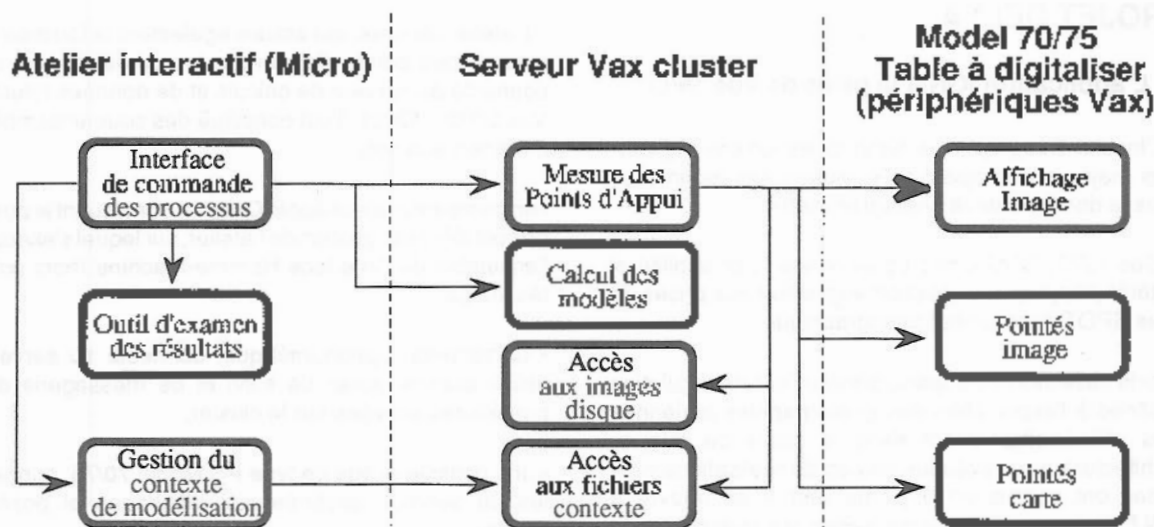
nes, cartes, mesures, modèles de prise de vues) et permettant de visualiser l'état d'avancement global des traitements aux différents niveaux (chantier, bloc, ...),

• un outil d'acquisition des prises de vues, permettant l'acquisition des données image et des données auxiliaires à partir des CCT dans un premier temps, la constitution des segments et bi-segments dans un second temps,

• un outil de mesure des points d'appui (ground control points), points de liaison (tie points) et points de contrôle (check points),

• un outil de modélisation simultanée des prises de vues au sein d'un bloc,

• un outil d'examen des résultats de modélisation, permettant la visualisation des résidus par points ou familles de points, ainsi que l'itération du calcul de modélisation après modification interactive de statuts des points.



Logigramme de l'atelier de spatiotriangulation d'IGN Espace

## II Analyse du besoin

D'une manière très générale, la plupart des applications utilisatrices d'imagerie numérique requièrent une ressource de modélisation de la géométrie des images tendant à rendre générique la correspondance géométrique existant entre l'objet réel et sa représentation par l'image.

Cette ressource, dont la mise en oeuvre peut être plus ou moins complexe selon le niveau de précision recherché, doit être intégrée au sein des systèmes de traitement et doit rester accessible lors des différents stades d'élaboration de l'information géographique par les applications utilisatrices.

Le projet Delta vise par conséquent le développement d'une ressource de modélisation géométrique des images qui soit générique et intégrable au sein des environnements existants.

Dans une logique d'exploitation opérationnelle des images, un recours au processus photogrammétrique s'impose quelle que soit la finalité visée :

- transformation géométrique des images en vue d'une élaboration d'un fond cartographique à partir d'images (iconocartes),
- détermination des caractéristiques géométriques (localisation, dimensions, ...) dans un référentiel terrestre d'un objet à partir de sa représentation mesurée dans l'image, et réciproquement,
- déterminations spécifiques (détermination du relief selon le principe de la stéréoscopie ou de l'interférométrie).

Le besoin global s'exprime en termes de modèle

géométrique associé à une image, utilisable au sein d'applications avales, et destiné selon les cas à la reconstruction géométrique d'objets dans l'espace physique tridimensionnel ou à la prédiction géométrique de ceux-ci dans l'image.

Le souci d'opérationnalité impose également que les applications soient rendues moins dépendantes ou sensibles aux découpages géographiques induits par les processus d'acquisition ou de distribution des images, en permettant :

- un redécoupage géographique de la donnée image, en général selon un gabarit cartographique,
- la manipulation d'images de grande taille, obtenues par assemblage d'images élémentaires et couvrant par conséquent des zones plus étendues,
- la manipulation de séries d'images multisources physiquement enregistrées (les maillages et phasages des images étant rendus identiques) ou virtuellement enregistrées (les correspondances géométriques entre images étant parfaitement définies).

La modélisation géométrique des images est devenue un facteur limitant dès lors que des applications nécessitent une totale transparence des aspects géométriques (localisation géographique, conformité des documents produits avec la cartographie existante, reproductibilité dans le temps).

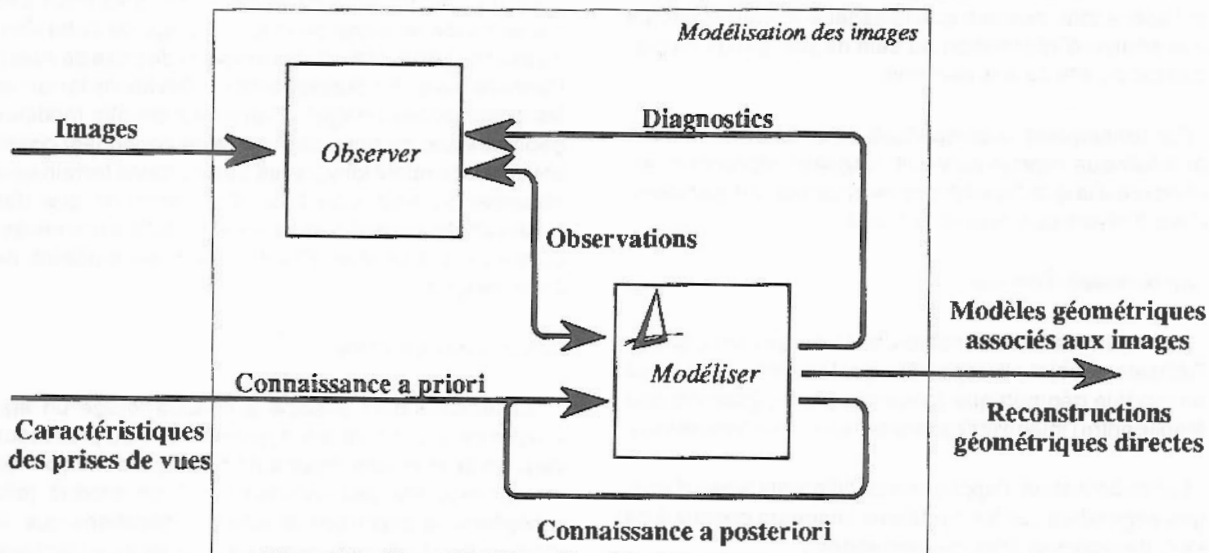
## III Delta : une approche globale de la notion de modélisation

Situé dans le contexte d'une filière d'élaboration d'information géographique, le terme de modélisation géométrique désigne la fonction générique qui permet l'édition de modèles géométriques associés aux images ou

la reconstruction géométrique d'objets dans ou à partir des images.

En considérant qu'une modélisation de précision ne peut être obtenue qu'en introduisant dans le processus de détermination des modèles des éléments de recalage observés, cette fonction générique se scinde principalement en deux ressources fonctionnelles dis-

tingentes, l'une assurant l'observation d'éléments de recalage (mesurés dans l'espace terrestre ou dans l'image), l'autre réalisant un filtrage de la connaissance a priori des caractéristiques géométriques de prise de vues à partir des observations effectuées. La mise en oeuvre de techniques photogrammétriques nécessite un couplage étroit entre ces deux fonctions.



Un modèle géométrique est élaboré à partir de la connaissance géométrique d'un processus de prise de vues et des caractéristiques connues de l'image. Il est dit systématique ou de précision selon que la connaissance utilisée correspond respectivement à une connaissance a priori ou a posteriori.

Une reconstruction géométrique est obtenue à partir de la connaissance géométrique d'un ou plusieurs processus de prise de vues et d'observations réalisées en ce sens. Elle est dite estimée ou restituée selon que la connaissance utilisée correspond respectivement à une connaissance a priori ou a posteriori.

La ressource de modélisation émet des éléments de diagnostic à des fins de contrôle du processus global. Elle émet également à destination du processus d'observation une estimation de la qualité des observations prises en compte et un certain nombre d'éléments de diagnostic destinés à la reprise d'observations ou à la réalisation d'observations nouvelles.

Enfin, un prédicteur (modèle géométrique simplifié) est transmis par le processus de modélisation géométrique vers le processus d'observation à des fins de détermination d'observations estimées.

### ■ Les exigences opérationnelles

Les applications sont de plus en plus exigeantes en termes de qualité de modélisation géométrique des images qu'elles manipulent : il devient par exemple primordial, pour des applications s'étalant dans le temps (statistiques agricoles, suivi du milieu naturel, évalua-

tion et suivi des catastrophes naturelles ...), de pouvoir compter sur une superposabilité parfaite des données sources, du fait d'une utilisation de plus en plus fréquente de celles-ci par des traitements automatisés.

Par ailleurs, les données satellites prennent une part croissante en tant que source d'information dans l'établissement de couvertures cartographiques pour des territoires non encore équipés ou la réfection de telles couvertures lorsqu'elles sont jugées comme étant de qualité insuffisante (amélioration topographique, réactualisation).

La multiplicité des sources d'information est également devenue une nécessité pour un grand nombre d'applications (étude d'un phénomène à différentes échelles ou dans différentes longueurs d'onde, garantie d'accessibilité aux données, notamment selon un calendrier prédéfini, ...).

### Les exigences de qualité

L'ensemble des considérations précédemment exposées impose un contrôle et un suivi continu de la qualité lors de la mise en oeuvre des techniques d'élaboration et d'utilisation des modèles géométriques d'images. Leur détermination est alors soumise à un certain nombre de contraintes d'optimisation destinées à maîtriser la qualité du résultat obtenu.

Ces contraintes peuvent résulter d'un choix de configuration relatif aux degrés de liberté du modèle géométrique à déterminer, d'une pondération des observations au moment de leur prise en compte ou d'une

cohérence nécessaire avec un ou plusieurs modèles préalablement déterminés ou une cartographie existante.

La maîtrise de la qualité géométrique ne peut se concevoir qu'en associant la préoccupation d'accéder au meilleur résultat possible à la nécessité d'obtenir une estimation de la confiance attachée à ce résultat. Cette qualification du résultat est en effet devenue tout aussi importante que le résultat par lui-même, ou du moins indispensable, dès lors que l'imagerie intervient en tant que source d'information au sein de processus de diagnostic ou d'aide à la décision.

Par conséquent, la complétude de la notion de modèle géométrique impose qu'y soit intégrée l'information nécessaire à la qualification des reconstructions géométriques d'objets que celui-ci autorise.

#### *Les données d'entrée*

L'élément de base considéré est l'image dont dispose l'utilisateur, objet par rapport auquel est défini le concept de modèle géométrique (correspondance géométrique établie entre l'image et l'espace terrestre tridimensionnel).

La modélisation s'applique aux différents types d'images engendrés par les systèmes imageurs connus à ce jour, de type satellites ou aéroportés :

- capteurs optiques (SPOT HRV, Landsat TM, JERS-OPS, photographie classique ...),
- capteurs actifs/passifs (SAR, sonars, lidars, ...).

En règle générale, des données annexes décrivant les caractéristiques statiques du système imageur ainsi que ses conditions de mise en oeuvre sont disponibles. Ces données reflètent l'état de la connaissance a priori (avant modélisation) du processus de prise de vues et sont par conséquent utilisées comme telles par le processus de détermination des modèles géométriques lorsqu'elles existent. La détermination des modèles géométriques reste cependant possible en mode dégradé lorsque certaines de ces données sont absentes.

Les images admises comme entrées potentielles correspondent aux images dites «en géométrie brute» (géométrie disponible en sortie des systèmes imageurs) ou aux images «prétraitées» (telles que déduites des précédentes par des prétraitements en ayant modifié la géométrie). Parmi ce dernier type d'image, seules les images ayant subi des prétraitements systématiques (en général réalisés au sein des centres de production de données) sont prises en compte.

En règle générale, des données annexes décrivant les caractéristiques des prétraitements réalisés sont disponibles. Ces données sont par conséquent utilisées comme telles par le processus de détermination des modèles géométriques.

#### *Les modèles géométriques de prise de vues*

La connaissance géométrique d'un processus de prise de vues se situe à différents niveaux :

- description statique du système, comprenant des paramètres physiques relatifs aux différents composants du système global,

- description dynamique du processus, incluant des conditions d'utilisation relatives aux différents composants du système global.

La prise en compte d'observations concernant des éléments de recalage permet le filtrage de cette connaissance (amélioration des modèles de prise de vues). Parmi celles-ci, on distingue les observations terrain et les observations images. L'amélioration des modèles géométriques de prise de vues reste cependant possible en mode relatif lorsque les observations terrain sont absentes au sein d'un bloc, étant entendu que des observations croisées entre images sont alors nécessaires pour améliorer effectivement les modèles de prise de vues.

#### *Les produits en sortie*

La modélisation associée à chaque image un état unique de la connaissance géométrique du processus de prise de vues correspondant. Bien que cette donnée ne corresponde pas exactement à un produit (elle n'intéresse a priori pas d'autres applications que la modélisation), elle est citée ici pour mémoire en tant que donnée produite associée à l'image.

Les modèles géométriques des images sont générés à partir de cet état de connaissance unique. Différents types de modèles sont envisagés, parmi lesquels :

- les modèles de localisation directs et inverses, décrivant une correspondance entre l'image et une surface terrestre de référence (position géographique homologue),

- les modèles de visée directs et inverses, décrivant une correspondance entre l'image et l'espace terrestre tridimensionnel (position du sommet de prise de vues, équation du lieu de visée).

Les modèles géométriques, afin d'être utilisables simplement par les applications aval se présentent sous une forme universelle permettant de résumer avec la précision requise la correspondance géométrique existant entre l'image et l'espace terrestre (formes polynomiales, grilles régulières destinées à l'interpolation, ...).

Lorsqu'ils sont issus d'un même bloc de modélisation, les modèles géométriques restent liés entre eux afin que soit conservée la mémoire des contraintes d'optimisation relatives au besoin initial de cohérence géographique et/ou temporelle. Ce lien reste également établi avec les états de connaissance des géométries de prise de vues associées.

Les reconstructions géométriques d'objet peuvent être estimées ou restituées, directes ou inverses (selon l'espace dans lequel l'objet est reconstruit), de type localisation (modèle d'objet totalement déterminé dans l'espace de reconstruction) ou visée (modèle d'objet

partiellement déterminé sous forme de visées dans l'espace terrestre tridimensionnel).

Parmi les types de reconstructions envisagés, la relocalisation de points dans l'espace terrestre tridimensionnel à partir d'observations images permet la restitution d'amers (densification géodésique).

Chaque donnée produite (modèle géométrique de prise de vues, modèle géométrique image, reconstruction géométrique) intègre un estimateur de la confiance attribuée à sa valeur :

- une donnée isolée est accompagnée d'une donnée annexe représentant un écart-type ou un écart maximum (associé à un seuil de probabilité fixé).
- une donnée vectorielle ou matricielle est accompagnée d'une donnée annexe de forme équivalente et de structure identique (une valeur estimative par valeur produite) ou d'un modèle estimatif (forme polynomiale,

grille) permettant de retrouver aisément une valeur estimée de la précision pour toute valeur produite.

## CONCLUSION

Permettant une exploitation cartographique des images géographiques, la photogrammétrie devient un outil tout aussi indispensable dans le cas des vues satellites que dans celui des photographies aériennes.

Favoriser le transfert de technologie entre le secteur de la recherche appliquée auquel appartiennent des organismes comme l'Institut Géographique National France et la communauté des utilisateurs au travers d'une industrie des systèmes de traitement d'information géographique, c'est participer à la recherche d'une rentabilité à terme des systèmes spatiaux d'observation de la Terre.