



HAL
open science

Triangulation spatiale de bloc d'images SPOT

Isabelle Veillet

► **To cite this version:**

Isabelle Veillet. Triangulation spatiale de bloc d'images SPOT. Astrophysique [astro-ph]. Observatoire de Paris, 1991. Français. NNT: . tel-02095460

HAL Id: tel-02095460

<https://hal.science/tel-02095460>

Submitted on 10 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THESE DE DOCTORAT
DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS
(nouveau régime)**

En
Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie
(option : Photogrammétrie)

présentée par

Isabelle VEILLET

Triangulation Spatiale de bloc d'images Spot

Essai et discussion
des possibilités des prises de vues satellitaires
pour la triangulation de bloc

Soutenue devant le jury composé de :

M. François BARLIER Président et Rapporteur
Astronome à l'Observatoire de la Côte d'Azur

M. Jean CHOROWICZ Examineur
Professeur à Paris 6 - Jussieu

M. Philippe HOTTIER Rapporteur
Ingénieur géographe en chef à l'IGN

M. Yves EGELS Directeur de thèse
Ingénieur géographe en chef à l'IGN

Septembre 1991

6943

THESE DE DOCTORAT
DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS
(nouveau régime)

En
Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie
(option : Photogrammétrie)

présentée par

Isabelle VEILLET



Triangulation Spatiale de bloc d'images Spot

Essai et discussion
des possibilités des prises de vues satellitaires
pour la triangulation de bloc

Soutenue devant le jury composé de :

M. François BARLIER Président et Rapporteur
Astronome à l'Observatoire de la Côte d'Azur

M. Jean CHOROWICZ Examineur
Professeur à Paris 6 - Jussieu

M. Philippe HOTTIER Rapporteur
Ingénieur géographe en chef à l'IGN

M. Yves EGELS Directeur de thèse
Ingénieur géographe en chef à l'IGN

Septembre 1991

La présente étude
a été menée
à l'Institut Géographique National.

Je tiens à remercier ici
toutes celles et tous ceux
qui, d'une façon ou d'une autre,
m'ont aidée et encouragée,
et sans qui
ce travail ne serait pas.

Résumé

Triangulation Spatiale de bloc d'images Spot

Outre la qualité de ses images, l'atout majeur du système Spot est sa précision géométrique.

Cette étude a pour objet d'évaluer l'apport d'une triangulation de bloc au traitement géométrique d'images Spot, afin de traiter globalement la géométrie de l'ensemble des images d'un chantier de spatio-cartographie.

Tant l'intérêt réel du calcul de blocs que sa faisabilité sont ici démontrés. Au préalable, il est indispensable d'analyser la modélisation de la prise de vues Spot.

Une modélisation simple, robuste et proche de la réalité physique de la prise de vues Spot est proposée.

Avec un nombre restreint de points d'appui, l'exactitude obtenue reste inférieure à 10 mètres en planimétrie et 6 mètres en altimétrie, ce qui est conforme à la plupart des standards de cartographie à l'échelle du 1:50000.

Sans point d'appui, une précision de 15 mètres a été obtenue sur des blocs couvrant 200km x 200km.

MOTS-CLEFS : SPATIOTRIANGULATION
GEOMETRIE SPOT
SPATIOCARTES . SPATIOCARTOGRAPHIE
COMPENSATION DE BLOC
PHOTOGRAMMETRIE

Abstract

Block adjustment of Spot images

Besides its image quality, the main advantage of Spot system is its geometric accuracy.

The aim of this study is the evaluation of what block adjustment can bring to Spot images geometric processing, in order to process together all the images of a space mapping project.

The actual advantage of this kind of computation is shown here. Before, a model of the image-ground relationship must be given.

The proposed model is simple, robust and close to the physical image acquisition.

Whith very few control points, the resulting accuracy is less than 10 meters in planimetry, and 6 meters in altimetry. These figures fit most standards of 1:50000 scale topographic maps.

Whitout any ground control point, the accuracy is 15 meters on 200km x 200km area.

*KEY-WORDS : SPOT TRIANGULATION
SPOT GEOMETRIC PROCESSING
SPACE MAP
BLOCK ADJUSTMENT
PHOTOGRAMMETRY*

Triangulation Spatiale de bloc d'images Spot

Essai et discussion
des possibilités des prises de vues satellitaires
pour la triangulation de bloc

Présentation

Cette étude a pour objet d'évaluer l'apport d'une triangulation de bloc au traitement géométrique d'images Spot. Tant l'intérêt réel, que la faisabilité sont à démontrer sur des blocs. Une définition préalable de la modélisation de la prise de vues Spot adaptée à ce type de traitement est indispensable.

Après une brève introduction donnant le cadre général de cette étude dans l'exploitation des données satellitaires pour la cartographie, le chapitre 2 en fixera la problématique et en détaillera les enjeux.

Le chapitre 3 décrira rapidement le système Spot et en précisera les caractéristiques utilisées par la suite.

Le chapitre 4 abordera la modélisation de la prise de vues Spot en analysant la liaison entre un point (M) du terrain et son image (m) à l'instant de la prise de vues.

Le chapitre 5 traitera de triangulation à partir d'un couple stéréoscopique, ce qui permettra d'apporter quelques compléments à la modélisation.

La compensation de bloc sera exposée au chapitre 6, et mènera au choix des inconnues retenues pour la modélisation définitive.

Enfin les vérifications expérimentales de la modélisation seront présentées au chapitre 7 ; les principales constatations relatives à l'équipement de blocs suivront alors.

Avant de conclure, les autres modélisations, développées parallèlement à cette étude par d'autres organismes, seront présentées et comparées.

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Présentation.....	iv
Table des matières.....	v
Table des figures.....	ix
1. Spot et la cartographie topographique	1
2. Le problème	2
2.1. Quoi.....	2
2.2. Pourquoi.....	2
2.3. Pour Quoi.....	2
2.3.1. pour assurer les raccords.....	2
2.3.2. pour réduire le nombre d'appuis nécessaires.....	3
2.4. Comment.....	3
2.5. Quelques remarques.....	3
3. Le système Spot	5
3.1. Caractéristiques générales.....	5
3.2. Le principe de prise de vues : HRV Push broom.....	6
3.3. La notion de segment.....	7
3.4. La géométrie interne.....	8
3.4.1. ϕ	8
3.4.2. f	9
3.4.3. barrette.....	10
3.4.4. $\beta + \epsilon$	11
3.4.5. ψ_x et ψ_y	12
3.5. Les données externes.....	13
3.5.1. Position et vitesse.....	13
3.5.2. Attitude.....	14
3.5.3. Temps de centre de scène.....	16
3.6. Les images.....	16

4. Modélisation de la prise de vues :	18
4.1. SM.....	19
4.2. sm.....	22
4.3. SM // sm.....	23
4.3.1. Equation de colinéarité.....	23
4.3.2. Linéarisation.....	23
4.3.3. Approximations.....	25
4.3.4. Remarques.....	25
4.3.5. Géoïde.....	26
4.4. Paramètres de la modélisation :.....	28
4.4.1. Géométrie interne.....	28
4.4.2. Position.....	28
4.4.3. Attitude:.....	28
5. Traitement stéréoscopique d'un couple	30
5.1. Principe.....	30
5.2. Modélisation d'un couple.....	31
5.2.1. Inconnues.....	31
5.2.2. Equations.....	32
5.3. Compensation :.....	33
5.4. Précision théorique attendue.....	33
5.5. Nécessité d'ajouter des équations d'information.....	34
5.5.1. Instabilité.....	34
5.5.2. Causes.....	36
5.5.3. Contrainte.....	37
6. Compensation de bloc	39
6.1. Un bloc.....	39
6.1.1. Points observés.....	39
6.1.2. Mesures.....	40
6.1.3. Images.....	40
6.1.4. Eléments de calcul.....	41
6.1.5. Compensation.....	42
6.2. Corrélation des inconnues.....	43
6.2.1. P_y/A_x	44
6.2.2. P_x/A_y	45
6.2.3. $(P_x, P_z)/F$	46
6.2.4. Examen des coefficients de corrélation.....	47

6.3.	Modélisation retenue.....	49
6.3.1.	Pourquoi F ?.....	49
6.3.2.	Critères de choix.....	49
6.3.3.	Paramètres retenus et conséquences.....	52
6.3.4.	Qu'apporte la gestion de bi-HRV ?.....	54
6.4.	Pondération.....	56
6.4.1.	Trois groupes d'observations.....	56
6.4.2.	Mesures :.....	57
6.4.3.	Relations terrain.....	59
6.4.4.	Equations d'information.....	59
6.4.5.	Pondération adoptée.....	60
7.	Vérification expérimentale du modèle	65
7.1.	Données.....	65
7.1.1.	Blocs de tests.....	65
7.1.2.	Calculs.....	66
7.1.3.	Chiffres.....	66
7.2.	Calcul de blocs.....	68
7.3.	Influence des facteurs externes.....	70
7.3.1.	Influence du rapport B/H.....	70
7.3.2.	Prise en compte du géoïde.....	70
7.3.3.	Qualité des points terrain.....	71
7.4.	Configuration d'appui.....	71
7.4.1.	Équipement d'un couple de segments.....	72
7.4.2.	Essais d'équipements allégés d'un bloc.....	72
7.4.3.	Répartition alti / plani.....	74
7.5.	Calcul de bloc sans points d'appui.....	75
7.5.1.	Intérêt.....	75
7.5.2.	Précision.....	75
7.5.3.	Déformation du bloc sans appui.....	76
7.6.	Autres facteurs importants.....	77
7.6.1.	Qualité des points et des pointés.....	77
7.6.2.	Qualité des liaisons.....	78
7.7.	Équipement minimum d'un bloc.....	80

8. Autres modélisations	82
8.1. Une grande diversité des approches.....	82
8.2. Leurs caractéristiques.....	83
8.2.1. Trajectoire linéaire.....	83
8.2.2. Trajectoire elliptique.....	85
8.2.3. Orbite perturbée.....	86
8.2.4. Ecart à trajectoire fournie.....	89
8.2.5. Récapitulation.....	91
8.3. Les résultats annoncés.....	92
8.4. Une étude comparée.....	93
9. Conclusion	96
Annexes	99
Annexe 1 les essais ADEF	100
Annexe 2 les essais franco-canadiens	111
Annexe 3 les essais OEEPE	113
Annexe 4 les essais KETIR	118
Annexe 5 le bloc DJIBOUTI	122
Annexe 6 le bloc IRAN	132
Annexe 7 Matrice de corrélation	133
Annexe 8 Calculs sans appui	138
Références bibliographiques et Bibliographie	140

Table des figures

Tab 3.1	: Caractéristiques du système Spot.....	6
Fig. 3.2	: Acquisition latérale.....	7
Fig. 3.3	: Acquisition Push broom et segment.....	8
Fig. 3.4	: Géométrie interne du HRV.....	9
Fig. 3.5	: HRV / satellite.....	12
Fig. 3.6	: Angles de visée.....	12
Fig. 4.1	: Liaison Point - Satellite.....	18
Fig. 4.2	: La visée calculée SM.....	20
Fig. 4.3	: Erreur en x et 'en y'.....	26
Fig. 5.1	: Principe de triangulation.....	30
Fig. 5.2	: Précision théorique.....	34
Fig. 5.3	: Exemple d'effet sur M d'une erreur de 4km sur P.....	35
Fig. 5.4	: Exemple d'effet sur P_y d'une erreur de 5m sur un appui.....	36
Fig. 5.5	: Exemple d'effet sur P_x d'une erreur de 5m sur un appui.....	37
Tab 6.1	: Inconnues.....	41
Fig. 6.2	: Corrélation P_y/A_x	44
Fig. 6.3	: Corrélation P_x/A_y	45
Fig. 6.4	: Corrélation $F/(P_x, P_z)$	46
Tab 6.5	: Matrice de corrélation entres inconnues.....	48
Tab 6.6	: Inconnues retenues.....	52
Tab 6.7	: Nombre d'inconnues par segment.....	53
Tab 6.8	: Inconnues par bisegment.....	54
Fig. 6.9	: Configuration pouvant être traitée par bisegment.....	55
Tab 6.10	: Résidus Moyens Quadratiques des mesures image.....	57
Fig. 6.10	: Méthode de détermination de la précision des mesures.....	61
Tab 6.12	: Evaluation de la précision des groupes de mesures.....	62
NOTA	: Résidus et écarts.....	63
NOTA	: Points de contrôle.....	68
Tab 7.1	: Comparaison du bloc sans appui au bloc de référence.....	76
Fig. 7.2	: Liaisons entre segments.....	79
Fig. 8.1	: Paramètres décrivant l'orbite du satellite.....	85
Tab 8.2	: Résumé des caractéristiques des diverses modélisations.....	92
Fig. 8.3	: Résultats comparés de blocs.....	93
Fig. 8.4	: Résultats comparés sur le bloc OEEPE.....	94

A1.1	: Polygone ADEF Localisation des scènes Spot acquises.....	105
A1.2	: Polygone ADEF Références des scènes Spot acquises.....	106
A1.3	: Bloc ADEF . points-terrain.....	107
A1.4	: Bloc ADEF . origine des points-terrain.....	108
A1.5	: Bloc ADEF . carte du géoïde.....	109
A1.6	: Bloc ADEF . calcul de référence . graphe des écarts.....	110
A3.1	: Les configurations d'appui des tests OEEPE.....	114
A3.2	: Graphique des écarts PLANI - tests OEEPE.....	115
A3.3	: Graphique des écarts ALTI - tests OEEPE.....	115
A3.4	: Ecarts au points de contrôle - tests OEEPE.....	116
A3.5	: Equipement d'un couple de segments.....	117
A4.1	: Bloc KETIR . calcul de référence.....	120
A4.2	: Bloc KETIR . configuration allégée.....	121
A5.1	: DJIBOUTI . localisation des scènes.....	124
A5.2	: DJIBOUTI . équipement terrain.....	125
A5.3	: DJIBOUTI . graphique des écarts terrain.....	126
A5.4	: DJIBOUTI . calculs avec 6 appuis alti et/ou plani.....	127
A5.5	: DJIBOUTI . appuis aux deux coins Sud.....	129
A5.6	: DJIBOUTI . appuis répartis au Sud.....	130
A7.1	: Matrice de corrélation du bloc ADEF.....	135
A7.2	: Matrice de corrélation du bloc ADEF.....	136
A7.3	: Matrice de corrélation du bloc ADEF.....	137
A8.1	: Précision de calculs sans appui.....	138

1. Spot et la cartographie topographique

Dès que des images satellitaires ont été disponibles, on a songé à les employer à des fins de cartographie, thématique dans un premier temps. Ce fut le cas pour les données des satellites Landsat, fournissant avec le capteur Thematic Mapper des images de trente mètres de résolution et utilisées dans des domaines variés des sciences de la terre.

Avec Spot, toute la surface de la Terre est couverte régulièrement, ce qui garantit des données disponibles, permettant par là-même d'élaborer un processus d'exploitation. Le pixel (tache élémentaire) de dix mètres (en mode panchromatique) et la stéréoscopie, offrant des applications géométriques ont ouvert une voie vers la spatio-cartographie topographique.

Le sens attribué ici au mot topographique, est bien "qui représente les formes du terrain", ou encore qui représente la surface du sol, objet tridimensionnel.

Quant à spatio-cartographie, le sens en est bien le sens officiel : cartographie réalisée principalement à partir de données des satellites d'observation de la terre, correspondant au terme anglo-américain *space map*.

Un chantier de cartographie à moyenne échelle est, a priori, relativement étendu, c'est-à-dire qu'il couvre plusieurs images. On conçoit aisément que les images d'un chantier forment un tout, et soient traitées globalement, en tout cas dans une phase préliminaire, plutôt qu'individuellement.

L'objet de cette étude, intitulée 'triangulation spatiale de bloc d'images Spot', est d'évaluer l'apport de cette méthode, traitant globalement la géométrie de l'ensemble des images d'un chantier, pour des travaux de spatio-cartographie.

Le principe de base de la spatiotriangulation, quant à ses objectifs, n'est pas nouveau. En effet, la démarche est exactement la même, sur le fond, que celle qui sous-tend les calculs d'aérotriangulation de blocs de clichés aériens. La seule différence réside dans la géométrie de la prise de vues.

La question posée fut plutôt la suivante : Est-il possible de faire des calculs "d'aérotriangulation" avec des images Spot ? Puis vint cette autre question: Qu'apportent ces calculs au traitement géométrique des images sur des chantiers étendus ?

2. Le problème

La Triangulation spatiale de bloc d'images Spot :

quoi, pourquoi, pour quoi, comment

2.1. Quoi

La spatiotriangulation, ou encore triangulation spatiale, est la détermination par le calcul des coordonnées sol d'un point observé sur deux images stéréoscopiques. C'est, par extension, le calcul de coordonnées de points inconnus à partir d'un petit nombre de points connus.

La spatiotriangulation de BLOC est le traitement géométrique global, ou simultané, d'images spatiales couvrant une zone étendue (i.e. s'étendant sur plusieurs images).

Ce terme de spatiotriangulation est malheureusement aussi utilisé actuellement pour désigner un calcul de spatiotriangulation de bloc ; c'est pourquoi ces définitions viennent d'être données ainsi.

2.2. Pourquoi

Parce qu'il faut traiter les chantiers étendus le mieux possible, c'est-à-dire aussi bien que les petits chantiers (inclus dans un couple), et à moindre coût.

Ceci explique que la référence en matière de précision des résultats sera celle obtenue sur des couples isolés. Il s'agit d'étendre à un bloc les résultats obtenus sur un couple de scènes.

2.3. Pour Quoi

2.3.1. pour assurer les raccords

Lors du traitement d'un chantier étendu, couvert donc par plusieurs images ou plusieurs couples d'images, on recherchera à assurer les raccords entre couples adjacents. Même en respectant les spécifications géométriques dans le traitement individuel de chaque couple, celles-ci risquent de ne pas l'être sur l'ensemble. La précision géométrique souhaitée est la même sur une zone raccord qu'à l'intérieur d'un couple.

Assurer les raccords entre couples (ou entre images) et **garantir l'homogénéité de la précision géométrique** est le but premier d'une compensation globale de spatiotriangulation.

2.3.2. pour réduire le nombre d'appuis nécessaires

Les travaux de terrain sont toujours coûteux, et souvent rendus difficiles soit pour la détermination géodésique ou topométrique des points, soit pour l'accessibilité de certaines régions rendue délicate, pour des raisons politiques, pour des raisons climatiques, ou bien pour cause de relief accidenté. Ceci explique la réduction toujours souhaitée du nombre de points terrain.

L'objectif second d'une spatiotriangulation de bloc est de faire des économies en matière de points d'appui.

Un calcul de spatiotriangulation de bloc peut ainsi être aussi considéré comme une densification de canevas de points au sol. Ce canevas densifié est souhaité cohérent et de précision homogène. Un tel canevas densifié est ensuite en général utilisé comme canevas d'appui à un traitement individuel des images en vue de produire un document cartographique. Ce canevas peut également être une fin en soi.

La recherche de l'équipement d'appui minimal a mené à évaluer d'une part, les extrapolations envisageables, d'autre part, ce qu'il est possible d'obtenir sans point d'appui.

2.4. Comment

La spatiotriangulation d'un bloc donné s'effectue, après l'équipement en points terrain du bloc, en observant des points sur des images, en intégrant les données connues sur la prise de vues, en s'appuyant sur quelques points connus, puis en effectuant un calcul global de compensation ; en deux mots en faisant comme pour l'aérottriangulation classique.

2.5. Quelques remarques

Cette étude a démarré dès les premiers temps du fonctionnement de Spot. La nécessité de calculs de triangulation spatiale de bloc est mentionnée dès la mise en service du système Spot (cf GIGORD 86, CNES 86).

Dès 86, on se préoccupa d'acquérir un bloc. La réunion des données nécessaires ne fut ni simple, ni facile, ni rapide ; ou plutôt, moins simple, moins facile, et

moins rapide qu'espéré. Ce qui reste conforme aux lois expérimentales en vigueur en la matière.

Evaluer l'apport d'une compensation globale, ne pouvait se faire sans une analyse de la modélisation géométrique Spot, pour définir la mieux adaptée à la triangulation de bloc.

3. Le système Spot

L'objet de ce chapitre est de ne décrire brièvement que les éléments du système Spot nécessaires à ce qui suit. Il n'est pas utile ici de faire une description exhaustive du système complet.

3.1. Caractéristiques générales

Le système SPOT, en service depuis début 1986, suite au lancement de Spot 1, fut le premier système offrant, au domaine civil, des images d'une résolution de 10m avec possibilité de prises de vues latérales.

L'orbite du satellite est une orbite héliosynchrone quasi-polaire, d'inclinaison I voisine de 98.7° , et quasi circulaire, d'excentricité e voisine de 0.001. Le satellite dispose de deux instruments de prise de vues, appelés HRV (Haute Résolution Visible).

Il repasse sur une même orbite tous les 26 jours ; afin d'augmenter la répétitivité des prises de vues sur une zone donnée, les instruments HRV sont orientables et permettent d'acquérir des vues obliques.

En acquisition verticale, le satellite couvre au sol une bande de 60 km, celle-ci atteint 80 km en visée oblique, où elle est alors distante de 450 km du nadir.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques générales (cf CNES 86) du système

Orbite	Altitude équatoriale	822 km	
	Inclinaison	98.7°	
	Heure solaire noeud descendant	10h30	
	Cycle	26 jours	
	Orbites / cycle	369	
HRV	Bandes spectrales	mode P	mode XS
		.51 - .73 μm	.51 - .59 μm .61 - .68 μm .79 - .89 μm
		Taille du pixel au nadir	10 x10 m
	Angle de visée dans le plan de l'orbite perpendiculairement β	+ .529° +27° à -27°	- .529° +27° à -27°
	Angle de vue α	4.13°	4.13°
	Focale f	1082 mm	1082 mm
	Image	Temps d'une ligne Δt	1.504 ms
Temps d'acquisition d'une scène		9.024 s	9.024 s
Pixels par ligne		6000	3000
Taille des pixels sur film 1A		25 μm	50 μm

Tab 3.1 : Caractéristiques du système Spot

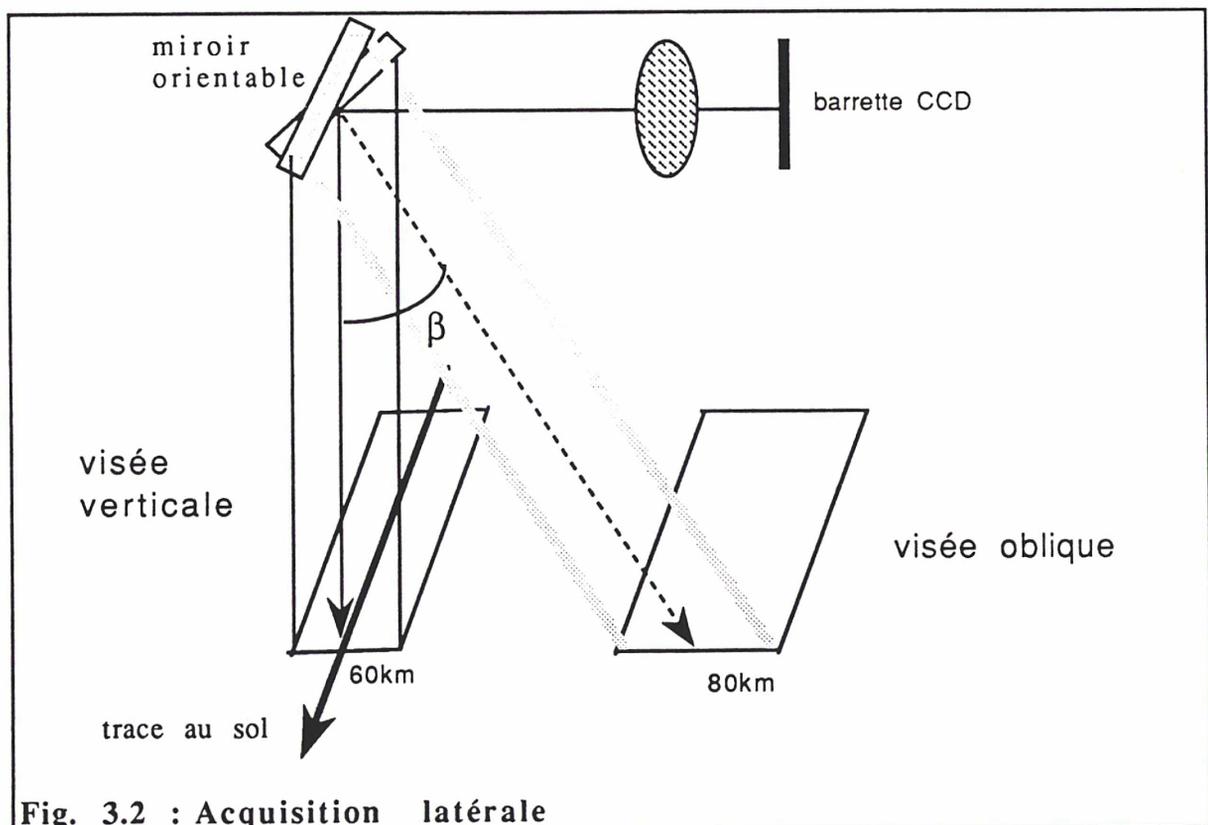
3.2. Le principe de prise de vues : HRV Push broom

Le capteur est une barrette CCD (Dispositif à Transfert de Charge) permettant d'enregistrer à un instant t , simultanément pour tous les détecteurs, la charge accumulée depuis $t-\Delta t$ par chacun d'entre eux.

L'unité de prise de vues est donc constituée de l'ensemble des valeurs des 6000 (3000 en XS) détecteurs enregistrées simultanément. Ces valeurs forment une ligne de l'image.

L'unité de prise de vue est unidimensionnelle.

Le capteur est fixe dans le HRV, le faisceau est orienté (d'un angle β) par un miroir qui subit une rotation de $\beta/2$. Cependant, pour la modélisation, il est commode de considérer que le référentiel du capteur subit une rotation d'angle β .



Le système de prise de vues Spot est un système dit *Push Broom*, car le mouvement du capteur dans l'espace (outre la rotation fixe du miroir) n'est dû qu'au déplacement du vecteur (le satellite en l'occurrence). En cela, la deuxième

dimension d'une image n'est donnée que par le déplacement du satellite le long de son orbite.

3.3. La notion de segment

On trouve comme définition d'un segment (cf ALBATTAH 89) qu'un segment est constitué de "plusieurs scènes consécutives prises de la même orbite avec la même orientation". Il semble néanmoins utile d'y apporter quelques compléments.

L'unité élémentaire de prise de vues est par construction, la ligne, ou l'ensemble des radiométries des détecteurs de la barrette. Une scène est constituée d'un nombre NL fixe de lignes (6000 en P et 3000 en XS) , nombre tel que 60 km au sol y soient représentés.

Sur une même portion diurne de trajectoire, (i. e. même orbite le même jour), plusieurs scènes acquises avec le même HRV, sous le même angle de prise de vues, consécutivement font partie d'une même entité regroupant un nombre de lignes supérieur à NL. C'est un segment.

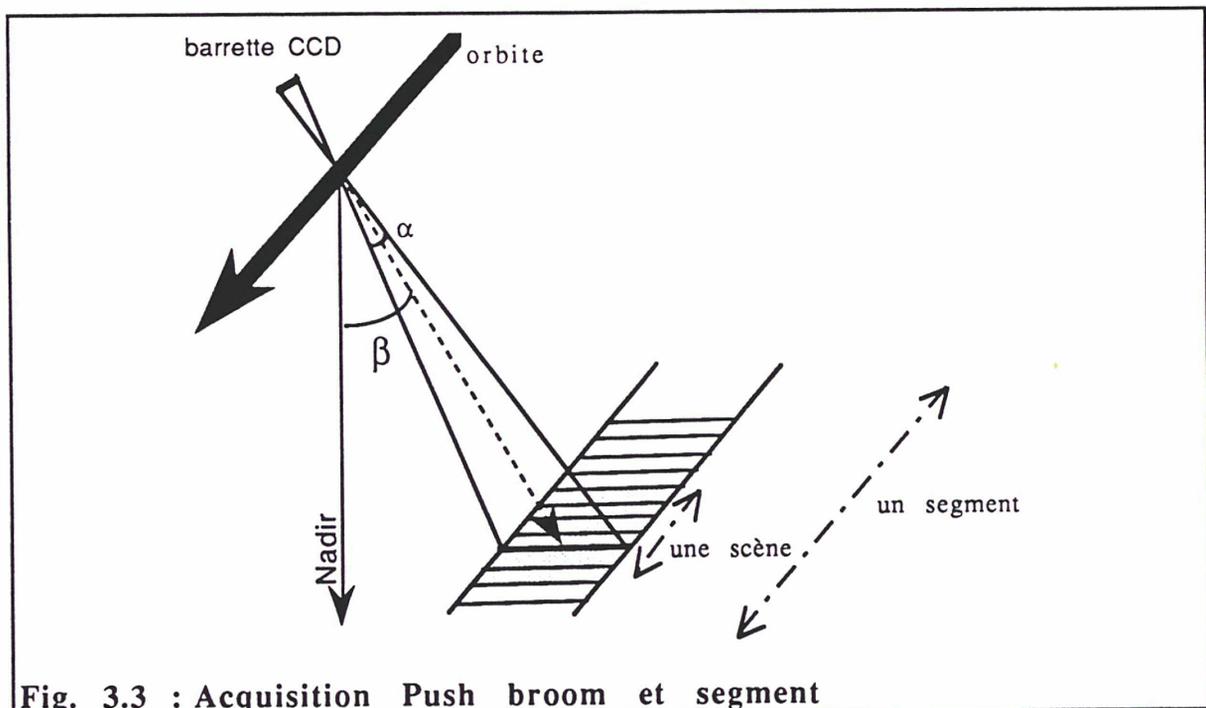


Fig. 3.3 : Acquisition Push broom et segment

Le segment correspond à l'unité de prise de vues. Un auteur américain (cf WILSON 89) désigne un segment par *imaging event*, que l'on pourrait traduire mot-à-mot par 'événement imageur', ce qui souligne cette unité d'acquisition que constitue le segment.

En pratique, un segment est constitué de scènes consécutives (en nombre entier) acquises le même jour par le même HRV.

Le découpage d'un segment en scènes n'est lié à aucune réalité physique de la prise de vues. L'unité qu'est la scène n'est qu'une unité de distribution des données.

Le traitement par segment peut être considéré comme la première étape d'un traitement simultané de plusieurs scènes (TOUTIN 85). Mais il est aussi possible de définir une scène comme un segment de 6000 lignes, et de ne pas distinguer dans leur traitement scène et segment.

Deux segments acquis simultanément (en partie au moins) par les deux HRV forment un **bisegment**. Un bisegment peut être constitué d'un segment d'une scène et d'un autre plus long. Cette notion peut apparaître intéressante pour lier les deux segments d'un bisegment, car bien évidemment position et orientation du satellite sont identiques pour les deux prises de vues simultanées.

3.4. La géométrie interne

Les données internes à l'instrument de prise de vues, le HRV, sont tous les éléments permettant à partir du n° de colonne (ou de détecteur) de déterminer le rayon de prise de vues dans un référentiel instrumental et en fait dans un référentiel satellite.

Ces données sont décrites dans les volumes 2 et 3 du Guide Des Utilisateurs Spot (Cf CNES SPOT Image 86). Certains éléments complémentaires sont issus de notes internes du CNES (cf CNES 83).

3.4.1. ϕ

Suivant le mode utilisé (panchromatique ou multispectral), la barrette de détecteurs est située à $\phi = 0.529^\circ = 0.923 \cdot 10^{-2}$ rad, en avant ou en arrière du centre optique.

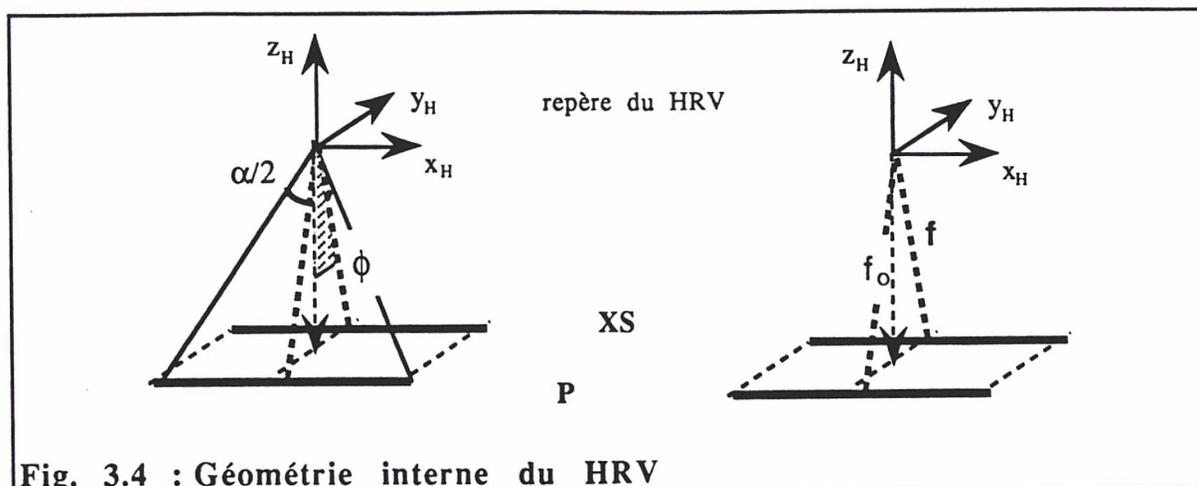


Fig. 3.4 : Géométrie interne du HRV

3.4.2. f

La focale des HRV est donnée, suivant les pages du document GDU Spot (CNES 86) égale à 1080 mm (p 3.12 Fig 3-6) ou à 1082 mm (p 3.7).

En outre, le système serait refocalisable, pour des raisons de netteté.

Quant à la taille des détecteurs (en mode panchromatique), elle est donnée à $13\mu\text{m}$ (p 3.15 CNES 86). Mais la valeur dont il faut incrémenter la tangente de l'angle pour un détecteur est $12 \cdot 10^{-6}$ (CNES 83, TOUTIN 85, GUICHARD 88).

Or :
$$\frac{\left(\frac{13\mu\text{m}}{1082\text{ mm}} - 12 \cdot 10^{-6}\right)}{12 \cdot 10^{-6}} = 1.23 \cdot 10^{-3}$$
, ce qui entraîne une incertitude de quelques 10^{-4} , voire de 10^{-3} .

On peut penser que ces différences sont dues au repère choisi : l'axe z du repère HRV, ou la direction principale de la visée passant par le centre de la barrette. Mais pour rapporter ces valeurs ($12 \cdot 10^{-6}$) au plan de prise de vue (f_0), la correction relative est de
$$\frac{f_0 - f}{f} = \cos^2 \phi - 1 = -\frac{\phi^2}{2} = \frac{(.923 \cdot 10^{-2})^2}{2} = -0.4 \cdot 10^{-4}$$
.

Que le repère soit lié au HRV ou à la barrette, il reste toujours une incertitude de quelques 10^{-4} .

Les interprétations varient également avec les utilisateurs : avec 1082 mm (HAITZMANN 88 et CHEN) et de 1083 mm (HOTTIER 88) à 1084 mm (HAAN 90) ou même $1085.4\text{ mm} (= \frac{13}{25} 2087.4)$ (KONECNY 87, LIAO 90). Ces 3mm d'écart signifient une divergence de vues de $3 \cdot 10^{-3}$.

Or une erreur de $5 \cdot 10^{-4}$ sur l'ensemble focale/barrette entraîne au sol un écart sur la largeur de la scène équivalent à $6000 \times 5 \cdot 10^{-4} = 3$ pixels soit 30 m, ce qui n'est pas tolérable.

Dans un premier temps c'est la valeur de $12 \cdot 10^{-6}$ que j'ai utilisée dans cette étude. Puis, les calculs m'ayant amenée à s'interroger sur la question, j'ai choisi d'ajouter cet élément en inconnue sous forme de coefficient d'anisotropie, en utilisant la donnée fournie comme valeur connue à 10^{-3} près.

Ce manque d'information sur la calibration photogrammétrique des capteurs HRV a d'ailleurs été signalé par Kratky (cf KRATKY 88b p 41). Ceci le conduit d'ailleurs à ajouter d'une part un facteur correctif de focale, et d'autre part un coefficient de distortion quadratique en x compensant le défaut d'alignement du HRV.

Ces deux défauts sont également corrigés par Guichard (cf GUICHARD 88 p 51 et 57) sont forme de 'corrections de barrettes' atteignant 0.18 pixel, soit $\frac{.18}{3000} = 6 \cdot 10^{-4}$, ce qui reste très en deçà des valeurs évoquées plus haut.

En revanche, Priebbenow (cf PRIEBBENOW 89 p99) précise qu'il n'est pas nécessaire d'introduire une inconnue de focale, et que la valeur qu'il utilise est assez précise.

La tolérance sur la focale aurait, semble-t-il, été fixée au mm. Cela suffit pour assurer localement un pixel de 10 m. Mais, ce n'est pas parce que les fonctionnalités du système sont atteintes avec une focale voisine de 1082 mm (à 10^{-3} , donc au mm), qu'il n'est pas nécessaire de connaître sa valeur (quelle qu'elle soit) plus précisément pour une utilisation métrique.

3.4.3. barrette

En réalité, la barrette de détecteurs est constituée de 4 barrettes différentes, appelées encore sous-barettes. La tolérance de raccord entre deux sous-barettes est de 0.1 pixel. Cette valeur de 0.1 pixel, correspondant à 1 m au sol, est le seuil en deçà duquel on peut négliger tout effet.

Il ne m'a pas semblé nécessaire de distinguer ces 4 barrettes dans la modélisation.

Néanmoins des essais ont été réalisés sur 3 scènes, par Priebbenow (Cf PRIEBBENOW 89 p) , mais il n'a pu en tirer aucune conclusion tangible, et dans le doute n'a pas pris cet élément en compte dans sa modélisation. En effet, il a chiffré, par recherche d'un systématisme sur les résidus de mesures observées sur les 4 sous-barettes, à 0.3 pixel maximum le saut au raccord de deux sous-barettes. Ceci reste dans la tolérance annoncée. De plus, il ne semble pas, dans ses

calculs, avoir dissocié ce phénomène de l'imprécision sur la focale. Et il ne me semble pas possible d'évaluer le premier, sans prendre en compte le second.

Des tests supplémentaires pourraient être conduits afin de garantir la valeur de raccord entre sous-barettes.

3.4.4. $\beta + \varepsilon$

Le pas miroir et le n° de HRV sont pris en compte pour évaluer la rotation entre référentiel attitude (lié au satellite) et référentiel instrument.

Il y a 91 pas-miroir de 0.6° chacun, permettant de désorienter le miroir de $\pm 27^\circ (= .6^\circ \times 45)$. Le PAS du miroir est fourni, par une valeur comprise entre 3 et 93. D'où $\beta = -(\text{PAS} - 48) \times 0.6^\circ$.

Quant à la rotation complémentaire liée au HRV utilisé, elle vaut $\varepsilon = \pm 0.163^\circ$ (2.10^{-4} rad env.).

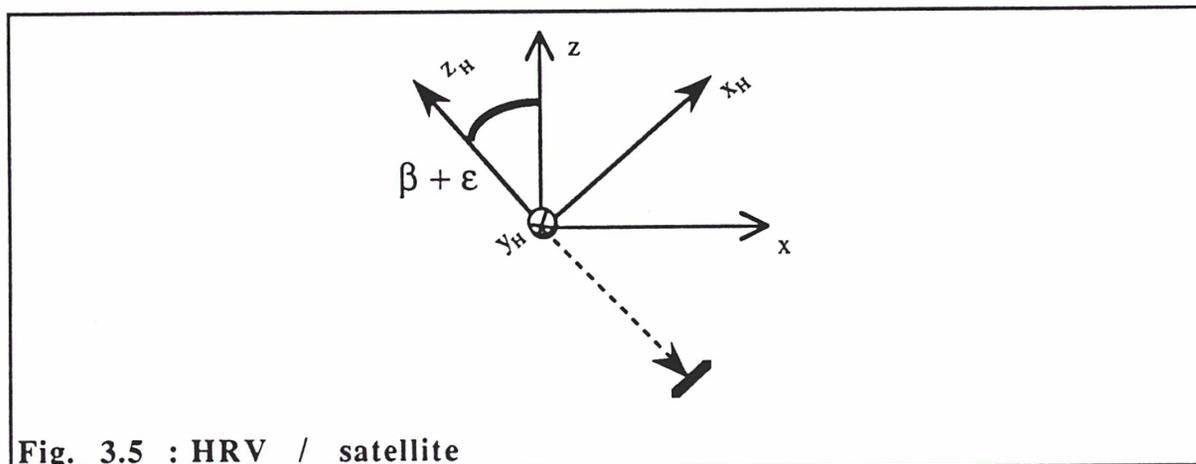
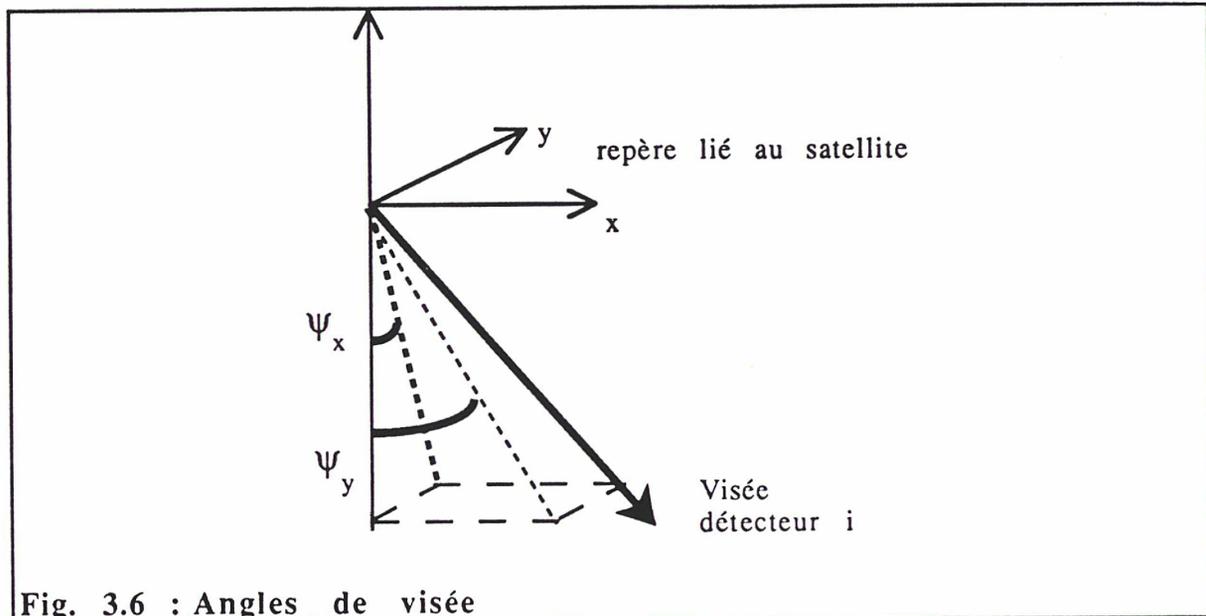


Fig. 3.5 : HRV / satellite

3.4.5. ψ_x et ψ_y

La direction de visée du détecteur i est défini par deux angles ψ_x et ψ_y comme le montre la figure suivante :



Les directions de visée des détecteurs extrêmes, dans le référentiel d'attitude, et non dans le référentiel instrument, sont fournies par les 4 angles ψ_{xD} , ψ_{yD} , ψ_{xF} , ψ_{yF} , en secondes de degrés (soit à $5 \mu\text{rd}$), prenant en compte une éventuelle refocalisation. Elles permettent de calculer directement la direction de visée du détecteur i .

Certains (cf PRIEBBENOW 89, OEEPE 91) utilisent ces angles pour recalculer la valeur de la focale du HRV, afin de disposer d'une valeur plus précise de celle-ci. Ces angles sont donnés, en seconde de degrés, soit, relativement à l'angle de champ, à $\frac{1^\circ/3600}{4.12^\circ} = 1/15000 = 6.7 \cdot 10^{-5}$; mais ne définissent pas, à mon avis, l'angle de champ à cette même précision.

3.5. Les données externes

Ce sont toutes les données externes à l'instrument lui-même, mais partie intégrante du système Spot, et indispensables au traitement géométrique des images. Elles sont encore appelées données auxiliaires.

Elles couvrent l'ensemble des données de "trajectoire" au sens large, comprenant position et attitude du satellite et temps de centre de scène.

Toutes ces informations figurent dans l'entête de la "bande CCT" contenant l'image Spot.

3.5.1. Position et vitesse

Le modèle de Terre utilisé comme référence pour spécifier la géométrie Spot est l'Ellipsoïde International 1980 ou *Geodetic Reference System 1980* (GRS 80), adopté en 1979 par l'IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics*), et dont on ne rappellera pas ici les caractéristiques (cf MORITZ 80).

Le "repère terrestre" dans lequel, en particulier sont fournies les éphémérides de Spot, est un repère orthonormé XYZ, géocentrique et solidaire de la Terre. Il est calé sur l'Ellipsoïde International 1980, de façon à ce que :

le centre de masse de la Terre soit le centre de l'ellipsoïde,

l'axe Z, porté par l'axe de symétrie de révolution de l'ellipsoïde soit dirigé vers le Nord,

l'axe X soit perpendiculaire à l'axe Z et passe par le méridien de longitude zéro, et qu'enfin le trièdre XYZ soit direct.

Dans tout ce qui suit, nous appellerons, par abus de langage, GRS80, ce repère terrestre calé sur le modèle de Terre GRS 80.

La Position (S) et la Vitesse (V) du satellite sont données, dans GRS80, toutes les minutes, à partir d'éphémérides recalculées.

Ces valeurs permettent, pour tout instant t, de calculer la position S(t) par interpolation par un polynôme de Lagrange de degré 7. Huit valeurs sont fournies, telles que les quatre premières se situent avant la date du centre de scène, et les quatre autres après.

Notant S_j , la valeur correspondant à t_j , $S(t) = \sum_{j=1,8} S_j \frac{\prod_{i \neq j} (t - t_i)}{\prod_{i \neq j} (t_j - t_i)}$.

Il a été démontré (Cf HOTTIER 88) que ce polynôme de Lagrange peut être remplacé par une fonction polynôme. Ceci offre l'avantage, une fois les coefficients de cette fonction calculés, d'exprimer de façon simple la variation S(t), et de réduire pour chaque t le nombre d'opérations élémentaires nécessaires au calcul de S(t) (et V(t)). Mais cela ne nous semble avoir d'intérêt que si le nombre d'instant d'observations exploités par scène est important ; pour des travaux de densification de canevas, ce genre de modélisation par polynôme ne semble pas utile.

C'est le calcul complet par interpolation de Lagrange que nous utiliserons, car l'optimisation du temps de calcul n'est pas un facteur-clé de cette étude.

L'exactitude des valeurs fournies, à savoir, l'écart entre ces valeurs (calculées) et les valeurs réelles (inconnues), est estimée par les chiffres ci-dessous.

En position, l'écart aux valeurs fournies, est évalué, à 3σ , comme suit :

		spécifications	après 2 ans de fonctionnement
altitude du satellite	L	300 m	100 m
écart le long de l'orbite	R	500 m	100 m
écart transversal à l'orbite	T	300 m	100 m

En vitesse, la valeur fournie est 1.1 m/s, soit une dérive menant à un écart de 10m par scène de 60 km de long. Cet écart se chiffre alors en relatif comme suit : $\frac{10 \text{ m}}{60 \text{ km}} = 1.6 \cdot 10^{-4}$.

3.5.2. Attitude

La stabilité du satellite lui-même le long de sa trajectoire est un facteur important pour un système de ce type. L'attitude du satellite est contrainte à rester inférieure à 0.15° . La variation d'attitude est limitée, par construction, en Tangage, Roulis et Lacet à $6 \cdot 10^{-4}$ /s.

L'attitude est ce qui permet de passer du repère orbital local TRL, au repère xyz, mentionné au paragraphe précédent (3.4), et lié au satellite.

Rappelons ici la définition du repère orbital local.

L'axe de lacet L est porté par la droite GS, où G est l'origine du référentiel géocentrique lié à GRS80 ; $L = \frac{GS}{|GS|}$.

L'axe de tangage T vérifie $T = \frac{L \wedge V}{|L \wedge V|}$.

Et l'axe de roulis vient compléter le trièdre $R = L \wedge T$

La dérive en attitude DA est enregistrée toutes les $\Delta t = 0.125 \text{ s}$, et fournie par rapport au repère (L,-R,-T) dans les données auxiliaires, par n° de ligne (L_i) et valeur en 10^{-6} /s.

DA est modélisée à partir des $DA(L_i)$ comme une fonction affine par morceaux, intégrée ensuite pour estimer \mathcal{A} . Le calcul de l'attitude \mathcal{A} , pour la ligne L, est effectué comme suit :

d'abord $\mathcal{A}(L_0) = 0$, puis par intégration $\mathcal{A}(L_i) = \mathcal{A}(L_{i-1}) + \Delta t \cdot \frac{DA(L_i) + DA(L_{i-1})}{2}$,

enfin par interpolation linéaire,

si $L_i > L > L_{i-1}$,
$$\mathcal{A}(L) = \frac{L - L_{i-1}}{L_i - L_{i-1}} [\mathcal{A}(L_i) - \mathcal{A}(L_{i-1})]$$

Les spécifications assurent une attitude inférieure à 0.15° (ou 2.6 mrd). Les tests (cf CNES 86) ont donné les valeurs maximales suivantes :

Tangage .7 mrd	Roulis .6 mrd	Lacet 1. mrd
----------------	---------------	--------------

Quant aux variations d'attitude, les RMQ de tests (cf CNES 86) ont donné $\pm 2.10^{-4}$ /s en Tangage et $\pm 1.10^{-4}$ /s en Roulis et Lacet.

Nous n'avons pas remis en cause l'intérêt d'intégrer au modèle les dérives en attitude, prenant exemple sur les travaux du logiciel de restitution Spot préalablement développé (cf GIGORD 86).

Une étude détaillée de ces variations d'attitude sur quelques scènes (cf ALBATTAH 89 p 37-39, PRIEBBENOW 89 p 272-275) montre une variation beaucoup plus forte en Tangage, atteignant ± 16 m sur une seule scène, qu'en Roulis ou Lacet (± 2 m).

Ces chiffres confirment l'intérêt qu'il y a à prendre en compte ces dérives en attitude fournies, en Tangage sur une seule scène, et pour les trois angles sur un segment.

3.5.3. Temps de centre de scène

Le temps de centre de scène est donné en millisecondes dans le jour julien d'acquisition. Ce temps est donc tronqué à la milliseconde, bien que le temps d'une ligne soit 1.504 ms.

La simple différence de date entre temps de centre de scène des scènes d'un segment ne représente donc pas un nombre entier de lignes.

Or, le temps de centre de scène est l'élément permettant de lier entre elles les scènes d'un segment. En effet, on ne peut se baser sur le recouvrement, ou nombre de lignes communes entre scènes consécutives, car il n'est pas fixe, dépendant principalement de l'azimut du segment.

La différence de date entre deux scènes consécutives sera réestimée, en partant du principe qu'un nombre entier de lignes les sépare.

3.6. Les images

A partir des éléments ci-dessus les données Spot peuvent être corrigées géométriquement à différents niveaux, et sont commercialisées sous ces différents niveaux.

Niveau	Traitement géométrique	Traitement radiométrique
0	rien	rien
1A	rien	égalisation des détecteurs
1AP	anamorphose en ligne	traitement complémentaire
1B	correction unidimensionnelle en ligne	id
2A	rectification 2D sans appui	id
2B	rectification 2D avec appuis	id
3	rectification 3D avec appuis et MNT	id

Les données utilisées pour la triangulation spatiale sont des images brutes au niveau géométrique, c'est-à-dire de niveau 1A maximum.

Notre objectif étant de déterminer globalement et précisément, les paramètres nécessaires aux corrections géométriques à partir du principe physique réel de la prise de vue, il n'est pas possible d'utiliser des données déjà traitées, même incomplètement. En effet, sur une image de niveau supérieur au 1A, il n'est pas possible, en effectuant des mesures sur un point, de déterminer ni le n° du détecteur qui l'a "pris", ni l'instant de prise de vue. Il n'est donc pas possible de situer ce point par rapport à l'instrument de prise de vue (dans le repère xyz). Seules les données brutes géométriquement sont exploitables.

Il existe des images spécialement prévues pour les applications photogrammétriques sur appareils de restitution analytique : le niveau 1AP sous forme de films accompagnés d'une CCT, ou d'une disquette, contenant les données auxiliaires. Elles sont traitées radiométriquement de façon à apporter un confort visuel optimum pour la stéréoscopie. Géométriquement, une anamorphose le long des lignes, de coefficient lié à l'angle de prise de vues, donne une échelle en 'x', proche de l'échelle en 'y' , ce qui participe au confort visuel d'ensemble.

Ainsi pour l'exploitation d'un couple dissymétrique (d'angles d'incidence différents), les plans d'égale altitude (plans de niveau) sont dans un plan perpendiculaire à la direction d'observation de l'opérateur. Cette anamorphose, parfaitement définie, est compensée sans difficulté aucune, à l'observation lors de la transformation film <-> image.

4. Modélisation de la prise de vues : La liaison Point - Satellite

L'utilisation des données du satellite Spot pour déterminer la position terrain de points d'une image, induit la connaissance de ce que nous appelons liaison Point - Satellite c'est-à-dire la façon dont un point sol (M) est lié à la mesure de son image sur la scène Spot (m).

Notant S et s la position du centre optique de prise de vues dans un référentiel lié au terrain et dans le référentiel de prise de vues, nous analyserons, tout en précisant les différents référentiels en jeu, d'abord SM, puis sm et enfin écrirons la relation de colinéarité les liant, et terminerons par les hypothèses complémentaires relatives à la modélisation de cette liaison Point - Satellite.

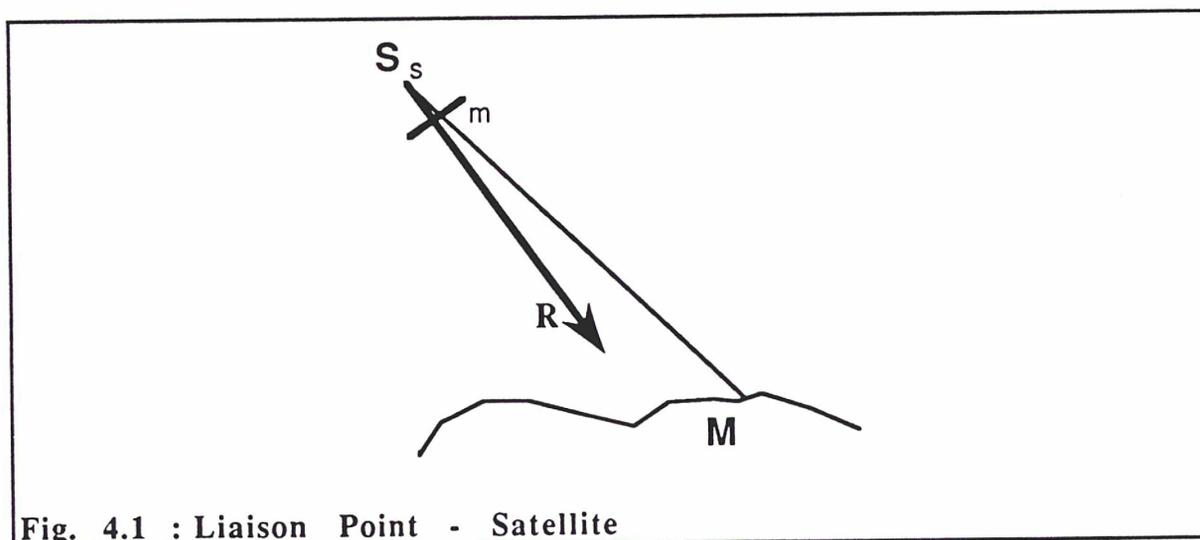


Fig. 4.1 : Liaison Point - Satellite

Le rayon de visée SM est assimilé à une droite.

En effet, les effets de la réfraction atmosphérique sur la courbure du rayon, peuvent être négligés pour l'exploitation des prises de vues Spot.

Il a été démontré (cf HOTTIER 87 p21) que l'effet au sol de la réfraction atmosphérique varie au maximum (donc en visée oblique à 30°), de 0.40 m entre bord droit et gauche d'une scène, ce qui est négligeable. L'erreur à prévoir en détermination altimétrique reste de l'ordre de quelques décimètres. En revanche, l'écart sur la position du satellite induite par la non prise en compte de la réfraction atteint 2 mètres, pas plus, ce qui pourrait être important si on s'intéressait à la position précise du satellite.

Le rayon de visée SM définit la visée calculée, par opposition à la visée observée sm issue de l'observation du point sur l'image.

Soient VC et VO les vecteurs visée calculée et visée observée. VO sera exprimé à partir des données internes à l'instrument de prise de vues, en fonction de l'observation, symbolisée par "sm", tandis que VC sera exprimé à partir des éléments externes et de la position du point, symbolisé par "SM".

Ces deux vecteurs doivent être écrits dans le même système, afin de remplacer $sm // SM$ par $VO = \lambda.VC$.

4.1. SM

\mathcal{F}

Le point M est connu dans un repère 'terrain', que nous appellerons repère 'carto' par la suite. Il s'agit, en général, du système de représentation cartographique choisi pour la zone de travail. C'est dans ce système que les coordonnées de M sont déterminées, s'il est connu. C'est dans ce système que les points issus de la triangulation seront exploités.

Ce système de représentation cartographique, est défini à partir d'un 'repère terrestre' géocentrique, associé à un modèle de Terre (ellipsoïde). Pour la partie planimétrie $(X_{\text{carto}}, Y_{\text{carto}})$, c'est une projection. L'axe Z_{carto} définit des altitudes, ou hauteurs sur géoïde, (et non hauteurs sur l'ellipsoïde).

Choisir ce type de repère 'carto' comme repère 'terrain' offre deux avantages :

- . Il est utile de distinguer la planimétrie (plan XY) de l'altimétrie (axe Z), représentant deux notions physiques importantes sur le terrain.
- . Les points connus peuvent l'être avec des précisions différentes en planimétrie et en altimétrie.
- . C'est dans ce repère que les points issus de spatiotriangulation seront exploités

On désignera par \mathcal{F} la transformation exprimant les coordonnées 'géocentriques' de M en fonction de ses coordonnées 'carto' : $M_{\text{géocentrique}} = \mathcal{F}(M_{\text{carto}})$.

\mathcal{H}

La position du satellite S, donnée auxiliaire fournie avec l'image, est donnée dans le référentiel géocentrique GRS80 (défini en 3.5.1). Il sera nécessaire d'écrire S et M dans un même système, et de disposer des éléments permettant le changement \mathcal{H} de système : $M_{\text{GRS80}} = \mathcal{H}(M_{\text{géocentrique}})$.

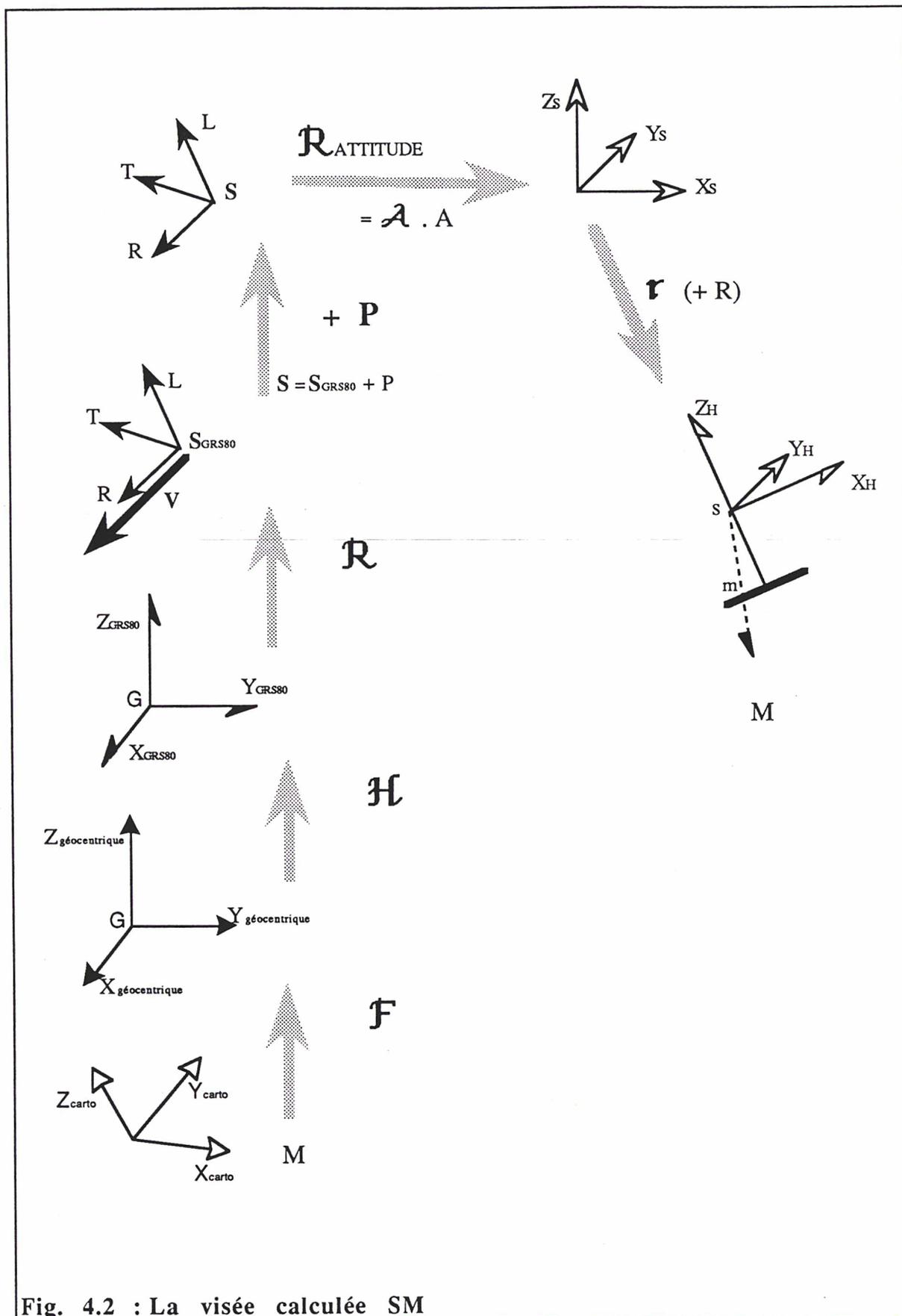


Fig. 4.2 : La visée calculée SM

En général, c'est-à-dire si les deux modèles de terre sont des ellipsoïdes, \mathcal{H} est une similitude (à 7 paramètres).

\mathcal{R}

Quant à l'attitude du satellite, les données fournies la chiffrent par rapport au repère orbital local TRL. Il nous faudra donc déterminer $\mathcal{R}_{\text{GRS80} \rightarrow \text{ROL}}$, à l'aide des positions S_{GRS80} et vitesse V du satellite.

C'est dans ce repère orbital local, afin de disposer de paramètres facilement interprétables, que l'écart P du satellite entre sa position réelle et sa position donnée sera évaluée.

Dans ce repère, le rayon de visée SM vaut : $\mathcal{R}_{\text{GRS80} \rightarrow \text{ROL}} \{M_{\text{GRS80}} - S_{\text{GRS80}}\} - P$
soit $\mathcal{R}_{\text{GRS80} \rightarrow \text{ROL}} \{ \mathcal{H} (\mathcal{F} (M_{\text{carto}})) - S_{\text{GRS80}} \} - P$

$\mathcal{R}_{\text{ATTITUDE}}$

$\mathcal{R}_{\text{ATTITUDE}}$ est la rotation qui permet de passer du repère orbital local TRL au repère $X_s Y_s Z_s$ lié au satellite, appelé repère attitude (et noté précédemment xyz). En intégrant les vitesses de dérive en attitude fournies, on exprime par \mathcal{A} cette rotation à la constante d'intégration près. Le complément d'attitude sera paramétré par une rotation A .

La direction de visée SM , dans le repère attitude s'exprime donc ainsi :

$$SM = \mathcal{R}_{\text{ATTITUDE}} [\mathcal{R}_{\text{GRS80} \rightarrow \text{ROL}} \{ \mathcal{H} (\mathcal{F} (M_{\text{carto}})) - S_{\text{GRS80}} \} - P]$$

\mathcal{r}

En utilisant une partie des éléments internes pour exprimer la visée dans le repère lié au HRV, il vient :

$$sm = \mathcal{R}_{\text{biais-HRV}} . \mathcal{A} . \mathcal{r}_{\text{pas-miroir+HRV}}(SM)$$

où, \mathcal{A} est la rotation paramétrant le complément d'attitude, et $\mathcal{R}_{\text{biais-HRV}}$ une rotation prenant en compte le défaut d'orientation du HRV, venant compléter $\mathcal{r}_{\text{pas-miroir+HRV}}$, rotation entre $X_s Y_s Z_s$ et $X_H Y_H Z_H$, mais ayant bien 3 paramètres angulaires constants (d'où l'indice 'biais-HRV').

Pour un segment simple, il n'est pas utile de dissocier A et $R_{\text{biais-HRV}}$; on posera $R_{\text{biais-HRV}} = I$, sachant que le paramètre A représente le défaut d'attitude et le défaut de HRV.

Pour un bisegment, l'orientation relative des deux HRV, l'un par rapport à l'autre ne peut être négligée. On prendra alors $R_{\text{biais-HRV1}} = I$, et $R_{\text{biais-HRV2}}$ en paramètre, notant que A représente le défaut d'attitude et le défaut du HRV1, et que $R_{\text{biais-HRV2}}$ représente le défaut du HRV2 par rapport au HRV1 (et non par rapport au repère d'attitude).

d'où l'expression de la visée calculée

$$VC = R_{\text{biais-HRV}} \cdot A \cdot r_{\text{pas-miroir+HRV}} \cdot \mathcal{A} \cdot [R_{\text{GRS80} \rightarrow \text{ROL}} \{ \mathcal{H}(\mathcal{F}(M_{\text{carto}})) - S_{\text{GRS80}} \} - P]$$

où R, A, P sont les paramètres de la modélisation
 \mathcal{A} , S_{GRS80} , $R_{\text{GRS80} \rightarrow \text{ROL}}$ dépendent du n° de ligne L de la mesure m
 $r_{\text{pas-miroir+HRV}}$, \mathcal{H} , et \mathcal{F} sont constants

La direction de visée est définie par VC_x/VC_z et VC_y/VC_z . Pour modéliser la 'focale', on prend $(1+F)$ comme coefficient d'anisotropie appliqué sur la composante ligne, c'est-à-dire la composante en x.

La direction de visée calculée a pour composantes :

$$UC \begin{vmatrix} (1+F)VC_x/VC_z \\ VC_y/VC_z \\ 1. \end{vmatrix}$$

4.2. s m

La taille d'un détecteur en microns étant notée δ ; dans le repère HRV, le rayon de visée observé VO, du détecteur c, fonction de c et du mode, est:

$$\text{visée}(c, \text{mode}) = VO = \begin{vmatrix} (c - c^\circ) \cdot \delta \cdot 10^{-6} \\ \pm \text{tg}\phi \\ -f_0 \end{vmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{où } \delta = 12. \text{ en P et } \delta = 24. \text{ en XS} \\ \text{suivant le mode P ou XS} \end{array}$$

où c° est le numéro de la colonne centrale (3000.5 en P et 1500.5 en XS).

Le rayon de visée observée a pour composantes :

$$UO \begin{vmatrix} VO_x/VO_z \\ VO_y/VO_z \\ 1. \end{vmatrix}$$

UO est décrit par UOx et UOy, deux tangentes, un écart valant $\delta \cdot 10^{-6}$ (considéré sans dimension ou en radians) est un écart d'un pixel.

4.3. SM // sm

4.3.1. Equation de colinéarité

Le principe de base est d'écrire que SM et sm, qui représentent tous deux le même rayon de visée assimilé à une droite, définissent la même droite, ou que les vecteurs directeurs de sM et sm sont colinéaires.

On écrit donc la colinéarité, dans le référentiel HRV, du vecteur visée calculé à partir de m, c'est-à-dire UO, et du vecteur visée calculé à partir de M, c'est-à-dire UC.

Ce qui donne ici

$$UO = UC$$

ou encore

$$UO(c) = UC(L, M, P, A, (R), F) \begin{vmatrix} c \text{ colonne mesurée} \\ L \text{ ligne mesurée} \\ M \text{ coordonnées du point} \\ P, A, (R), F \text{ paramètres de modélisation} \end{vmatrix}$$

C'est une relation d'observation exprimant une grandeur observée en fonction des paramètres dont dépend, si le modèle est correct, sa valeur nominale, i.e. "réelle", malheureusement inconnue du fait des erreurs de mesure.

4.3.2. Linéarisation

Cette relation d'observation est loin d'être linéaire. On la linéarise en fonction des paramètres du modèle. En négligeant l'erreur en temps induite par une erreur de ligne L_{ix} , UC se différencie sous la forme suivante :

$$dUC = .. dM + .. dP + .. dA + .. dR + .. dF$$

Le but est de remplacer ultérieurement la relation $UO = UC$ par la relation linéaire $UC_0 + dUC - UO = 0$

Soit :

$$\text{posant } UC'_x = \frac{VC_x}{VC_z}, \quad UC_x = (1 + F) UC'_x$$

$$dUC_x = (1 + F) dUC'_x + UC'_x \cdot dF \qquad dUC'_x = d\left(\frac{VC_x}{VC_z}\right) \qquad dUC_y = d\left(\frac{VC_y}{VC_z}\right)$$

$$d\left(\frac{VC_x}{VC_z}\right) = (VC_x dVC_z - VC_z dVC_x) / VC_z^2$$

$$d\left(\frac{VC_y}{VC_z}\right) = (VC_y dVC_z - VC_z dVC_y) / VC_z^2$$

$$\text{Or } VC = R_{\text{biais-HRV}} \cdot A \cdot r_{\text{pas-miroir+HRV}} \cdot \mathcal{A} \cdot [R_{\text{GRS80} \rightarrow \text{ROL}} \{ \mathcal{H} (F (M_{\text{carto}})) - S_{\text{GRS80}} \} - P] ,$$

$$\text{ou encore, en simplifiant les notations, } VC = R A r \cdot \mathcal{A} [R \{ \mathcal{H} (F (M)) - S \} - P] .$$

D'où,

$$dVC = R A r \cdot \mathcal{A} [R \mathcal{H} T dM - dP] + dR A r \cdot \mathcal{A} [R \{ \mathcal{H} F M - S \} - P] + R dA r \cdot \mathcal{A} [R \{ \mathcal{H} F M - S \} - P]$$

en remplaçant F par T , constante sur le bloc, (approximation présentée en 4.3.3).

Si A est une rotation représentée par les trois coordonnées du vecteur a tel que la rotation $A = e^{\tilde{a}}$, où \tilde{a} est l'axiateur du vecteur a, c'est-à-dire la matrice de l'application linéaire $u \rightarrow \tilde{a}(u) = a \wedge u$, alors $dA u = - A \tilde{u} da$.

Ce qui donne

$$dVC = R A r \cdot \mathcal{A} [R \mathcal{H} T dM - dP] - \tilde{V}C dr - \tilde{V}C da$$

Notant (Ax,Ay,Az) les trois coordonnées du vecteur a dont A est l'axiateur et prenant une notation identique pour (Rx,Ry,Rz).

alors

$$\begin{aligned} dUC'_x = & \{ R A r \cdot \mathcal{A} [R \mathcal{H} T dM - dP] \}_x / VC_z - \{ R A r \cdot \mathcal{A} [R \mathcal{H} T dM - dP] \}_z UC'_x / VC_z \\ & - dAx UC'_x \cdot UC_y + dAy (1 + UC'^2_x) - dAz UC_y \\ & - dRx UC'_x \cdot UC_y + dRy (1 + UC'^2_x) - dRz UC_y \end{aligned}$$

$$dUC_x = (1+F) dUC'_x + UC'_x dF \tag{1}$$

$$\begin{aligned} dUC_y = & \{ R A r \cdot \mathcal{A} [R \mathcal{H} T dM - dP] \}_y / VC_z - \{ R A r \cdot \mathcal{A} [R \mathcal{H} T dM - dP] \}_z UC_y / VC_z \\ & - dAx (1 + UC_y^2) + dAy UC'_x UC_y + dAz UC'_x \\ & - dRx (1 + UC_y^2) + dRy UC'_x UC_y + dRz UC'_x \end{aligned} \tag{2}$$

où $\{\dots\}_x$, $\{\dots\}_y$, $\{\dots\}_z$ désignent les trois coordonnées du vecteur exprimé entre les accolades $\{\dots\}$.

Ce qui fournit deux équations, l'une dite 'en x', l'autre dite 'en y' :

$$\begin{cases} UC_x + dUC_x - UO_x = 0 \\ UC_y + dUC_y - UO_y = 0 \end{cases}$$

4.3.3. Approximations

Quelques approximations ont été effectuées au cours de cette opération de linéarisation.

1. dUC n'est fonction que de dM , dP , dA , dF (dR)

Le temps de la mesure, calculé à partir de la mesure de ligne, $L_{i\alpha}$, n'est pas réévalué; ou encore, S_{GRS80} (puis $\mathcal{R}_{GRS80 \rightarrow ROL}$) et \mathcal{A} sont calculés une fois pour toutes au début, et non recalculés après. Ceci pourrait poser problème si une erreur de mesure en ligne faussait de façon notable ces trois grandeurs.

Pour S , la plus importante erreur induite par une erreur de mesure d'une ligne est un décalage de 10m environ le long de la trajectoire ; en revanche pour l'attitude, l'erreur sur la partie constante à modéliser est de l'ordre de 1m au sol, ce qui est donc négligeable.

2. Dans le calcul des coefficients les petites rotations sont supposées commuter, notamment A et R .

3. Transformation \mathcal{F} (carto \rightarrow géocentrique)

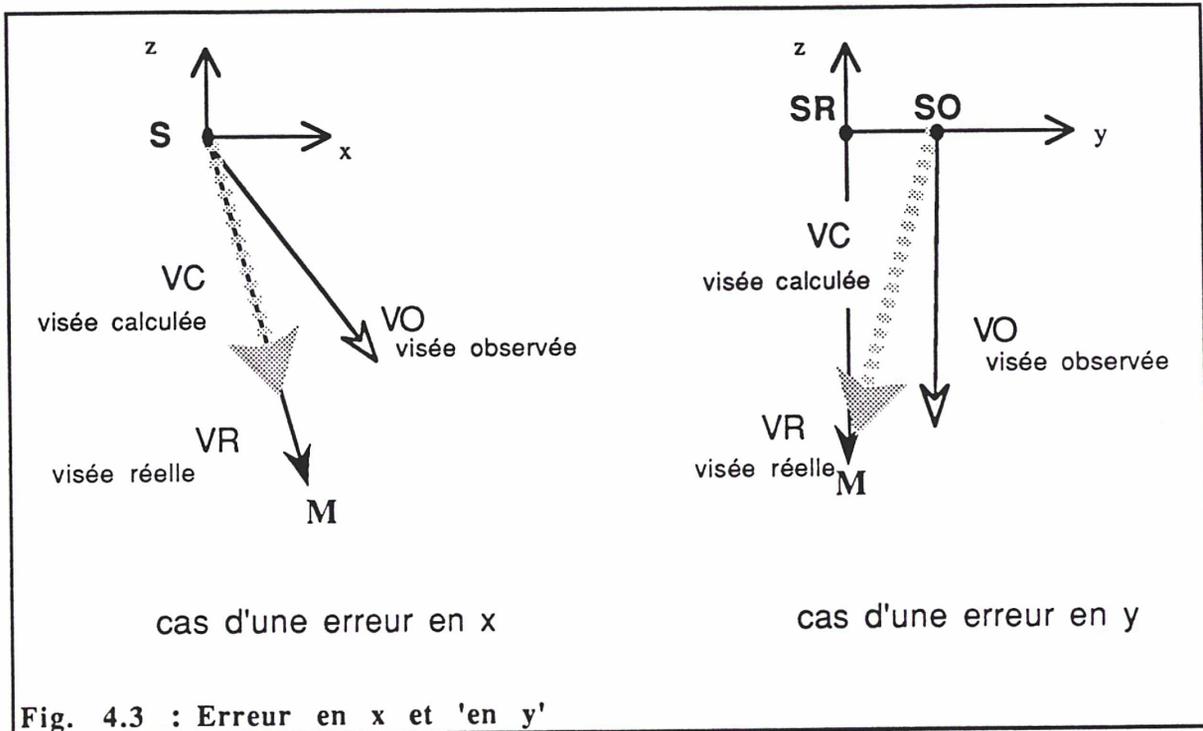
Devant dM , \mathcal{F} , application non linéaire, est remplacée par une rotation (linéaire), constante sur le bloc $\mathcal{T} = \mathcal{R}_{\text{géocentrique} \rightarrow \text{local-tangent}}$. Cette approximation se justifie par le fait que lorsque la convergence est assurée et la solution atteinte, l'inconnue différentielle recherchée dM est nulle, donc $\mathcal{F}(dM)$ aussi, comme $\mathcal{T}(dM)$.

4.3.4. Remarques

De par la géométrie de la prise de vue, les équations 'en x' et 'en y' n'ont pas le même sens. Le choix effectué pour écrire les équations d'observation laisse penser qu'il y a bien deux équations d'observations. Mais en fait "l'observation

en x'' est liée à la mesure du n° de colonne, comme dans une géométrie conique, mais "l'observation en y ", n'est pas liée directement à la mesure en ligne.

Cette approche mène au phénomène suivant : en supposant que d'autres mesures permettent de calculer la position réelle (ou quasi) de M,



tandis qu'une erreur de colonne, ou erreur en x , d'une mesure sur ce point, aboutira à ce que la visée calculée tende vers la visée réelle, en se détachant de la visée observée erronée,

une erreur de ligne, ou erreur en y , d'une mesure sur ce point amènera bien la visée calculée à passer par M, mais elle ne se rapprochera jamais de la visée réelle, car S correspond à la valeur SO observée et non à SR.

Ceci serait parfaitement compensé et corrigé si la date d'observation était réévaluée à sa valeur probable. Mais, comme on cherche des coordonnées terrain de points M et non l'exacte reconstitution dans l'espace de la direction de visée SM, ce point n'a que peu d'importance.

4.3.5. Géoïde

La hauteur du géoïde sur l'ellipsoïde intervient dans la transformation \mathcal{F} . Autant sur une scène cette hauteur de géoïde peut être négligée - car le géoïde peut y

être supposé différer de l'ellipsoïde d'une similitude qui s'inclut alors dans la modélisation générale - autant sur bloc étendu, voire très étendu, ceci devrait être pris en compte.

Sur le bloc de test situé dans le Sud de la France (cf Annexe 1 : ADEF). La variation de hauteur de géoïde atteint 5m, valeur qui ne peut être négligée. La hauteur de géoïde varie elle-même de 11m sur les Alpes à 6m à Marseille et 7m dans la vallée du Rhône pour remonter à 9m sur le Velay.

Pour les autres blocs, la valeur, lorsqu'elle a été introduite, était constante sur le bloc en l'absence de données plus précises.

4.4. Paramètres de la modélisation :

4.4.1. Géométrie interne

Le paramètre F, coefficient d'anisotropie, est modélisé par une constante.

4.4.2. Position

Le vecteur P, écart à la position fournie S, est modélisé par une fonction polynôme de t : $P(t) = P^0 + t.P^1$. Les prévisions sur la précision de S prévoyaient que l'écart de S à la position réelle serait modélisé par un polynôme en t de degré 2 au plus. Le degré 1 s'est avéré suffisant à l'issue des vérifications sur les données réelles, et les résultats de précision de triangulation avec ce modèle présentés au chapitre 7 le confirmeront. Le degré 1 a été retenu.

Six coefficients au total définissent alors P pour le segment.

$$P^0 \begin{vmatrix} P^0_x \\ P^0_y \\ P^0_z \end{vmatrix} \quad P^1 \begin{vmatrix} P^1_x \\ P^1_y \\ P^1_z \end{vmatrix}$$

4.4.3. Attitude:

L'attitude complémentaire A, est représentée, comme défini en 4.3.2, par les trois coordonnées du vecteur a tel que la rotation d'attitude $A = e^{\tilde{a}}$, (où \tilde{a} est l'axiateur du vecteur a, c'est-à-dire la matrice de l'application linéaire $u \rightarrow \tilde{a}(u) = a \wedge u$).

Pour une petite rotation, et A en est une car ses trois angles sont inférieurs à 1 mrad, on peut considérer que a est constitué des trois angles de la rotation A autour des axes x,y,z. Cette approximation est une approximation de langage qui nous fera désigner Ax, Ay et Az par Roulis, Tangage et Lacet, car les formules mathématiques seront, elles, rigoureuses.

Par la suite, il sera utilisé la notation A indifféremment pour parler de la rotation A ou du vecteur $a = (Ax, Ay, Az)$.

L'attitude complémentaire A est modélisée par un polynôme en t, dont le coefficient A^0 représente la constante d'intégration inconnue. Le degré retenu, à l'issue de nos premiers essais, pour ce polynôme est le degré 0, soit uniquement la constante d'intégration.

Comme nous le verrons dans le chapitre 8, certains ont adopté une modélisation de degré supérieur, il n'est pas évident que cela améliore réellement leur modèle. Nous avons, au début, effectué des calculs en faisant varier ce degré, sans noter aucune amélioration au sol ; nous n'avons pas poursuivi dans cette direction, d'autant que notre objectif était plus de définir le jeu strictement nécessaire de paramètres que d'augmenter leur nombre.

Trois coefficients définissent donc A pour le segment :

$$A^0 \begin{vmatrix} A^0_x \\ A^0_y \\ A^0_z \end{vmatrix}$$

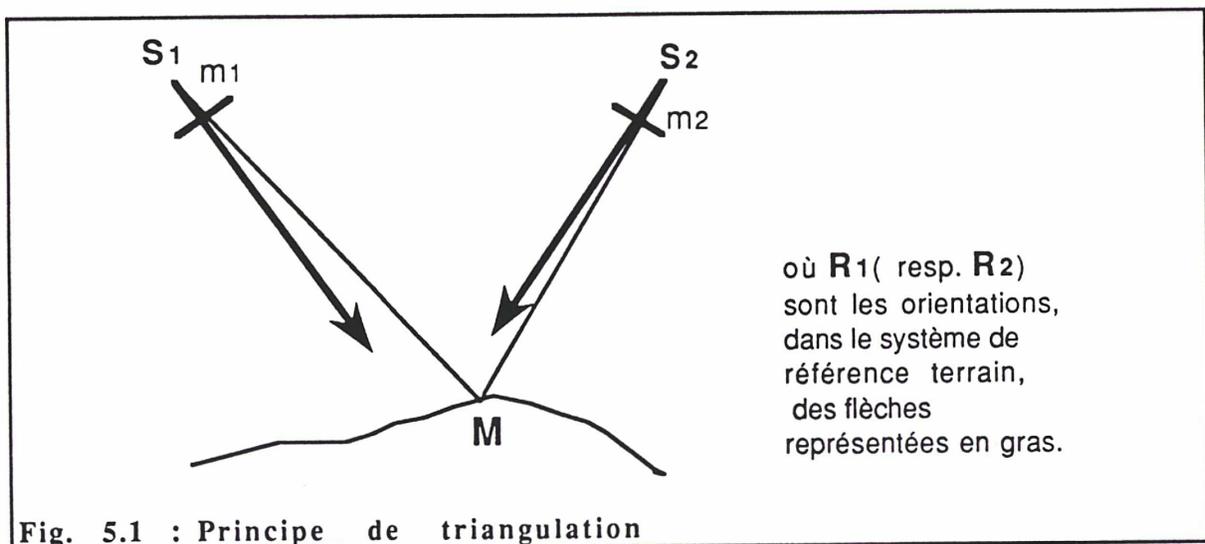
Dix coefficients interviennent au total dans cette modélisation de la prise de vues Spot, sous sa forme brute. La suite (chapitre 6) montrera que ce chiffre de 10 peut être réduit.

5. Traitement stéréoscopique d'un couple

Très schématiquement, ce chapitre montrera qu'il est possible de "faire de la photogrammétrie avec Spot" et que la connaissance de la trajectoire 'donne' une deuxième dimension à une instrument de prise de vues linéaire, de dimension 1.

5.1. Principe

Les coordonnées du point M sont calculées par intersection des deux rayons de visée (S_1M, S_2M), connus à partir des positions (S_1, S_2) et orientations (R_1, R_2) des deux HRV, et des positions des deux images (m_1, m_2) du point M dans les deux scènes.



Ceci suppose que l'on peut associer m_1 et m_2 , c'est à dire les reconnaître comme images dans les scènes 1 et 2 du même détail M du terrain. Cet appariement est effectué visuellement par un opérateur (pointé stéréoscopique), ou automatiquement (par corrélation).

Avant de calculer la position de M, il faut déterminer les positions (S_1, S_2) et les orientations (R_1, R_2) de chacun des deux HRV, à partir des données auxiliaires et de points terrain d'appui.

C'est la même relation de colinéarité qui permet en deuxième phase de déterminer M, et en première phase de déterminer (S_1, S_2, R_1, R_2) à partir de points (M, m_1, m_2), dont certains ont leurs coordonnées terrain connues (M_T).

5.2. Modélisation d'un couple

La modélisation d'un couple conduit à la résolution d'un système liant les inconnues par des équations.

La méthode de résolution sera abordée après le recensement des inconnues, et la pose des équations.

L'approche présentée ici pour poser ce système d'équations, est la plus commode à utiliser dans la pratique. Elle est employée en photogrammétrie analytique.

Elle a la particularité de traiter toutes les mesures de façon identique, sans y dissocier les points connus des points inconnus, et de considérer les données d'appui comme des observations éventuellement entachées d'erreurs, voire de fautes. Elle permet, de plus, de dissocier les appuis altimétriques des appuis planimétriques, ou d'inactiver une relation d'observation en supprimant l'équation d'observation associée dans le calcul global.

5.2.1. Inconnues

Les inconnues sont de trois types :

5.2.1.1. Externes liées aux segments

Ce sont les inconnues de position et orientation des deux faisceaux, c'est-à-dire (S_1, S_2, R_1, R_2) , ou encore en suivant la modélisation retenue, pour chacun des deux segments : $P_\alpha^0, P_\alpha^1, A_\alpha^0$, avec $\alpha = 1$ ou 2 .

5.2.1.2. Interne des HRV

F_α , coefficient d'anisotropie, affinant la modélisation de la géométrie interne du HRV. L'introduction de cette inconnue est justifié par la non connaissance précise de cet élément (cf 6.3.1.). Celle-ci s'ajoute à des problèmes, qui sont peut-être dus aux films qui proviennent sûrement d'une anisotropie des mesures introduite par erreur dans les premiers jeux de mesures exploités.

5.2.1.3. Points

$M_i (X, Y, Z)$ les trois coordonnées de chacun des points observés.

5.2.2. Equations

5.2.2.1. Image

Les équations image sont les équations d'observation (exprimée en 4.3.1) de chaque mesure $m_{i;\alpha}$, du point i sur le segment α :

$$UO(c_{i;\alpha}) = UC(L_{i;\alpha}, M_i, P_\alpha, A_\alpha, R_\alpha, F_\alpha)$$

Ce sont les deux équations de colinéarité signifiant que $s_\alpha m_{i;\alpha} // S_{i;\alpha} M_{i;\alpha}$. Elles sont pondérées par σI .

5.2.2.2. Terrain

Les équations terrain expriment la connaissance de coordonnées terrain des points d'appui, comme des équations d'observation de ces coordonnées. Elles sont écrites dans le référentiel terrain (ou carto).

$$\left| \begin{array}{l} X_j = X_{jT} \\ Y_j = Y_{jT} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{pondérée par } \sigma X Y \\ \text{si le point } j, M_j \text{ est point d'appui planimétrique} \end{array}$$

$$\left| \begin{array}{l} Z_k = Z_{kT} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{pondérée par } \sigma Z \\ \text{si le point } k, M_k \text{ est point d'appui altimétrique} \end{array}$$

Bien évidemment un point peut être à la fois appui planimétrique et appui altimétrique, en ce cas les trois équations sont écrites pour ce même point.

5.2.2.3. Information

Les équations d'information traduisent le fait que la trajectoire modélisée respecte les spécifications connues du système Spot. Elles sont traitées comme équations d'observation. Sans elles le système est difficilement soluble et leur nécessité est justifiée ci-dessous en 5.5.

$$\left| \begin{array}{l} P_\alpha^0 = 0 \\ P_\alpha^1 = 0 \\ A_\alpha^0 = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{pondérée par } \sigma P \\ \text{pondérée par } \sigma V \\ \text{pondérée par } \sigma A \end{array}$$

$$\left| \begin{array}{l} F_\alpha = 0 \end{array} \right. \quad \text{pondérée par } \sigma F$$

5.3. Compensation :

La résolution de ce système d'équations d'observations s'effectue en utilisant la méthode dite des moindres carrés, minimisant la somme des carrés des résidus de mesure, relativement simple à mettre en oeuvre et nécessitant peu d'hypothèses statistiques sur les erreurs (suivant une loi normale centrée).

Ce système n'étant pas linéaire, on le résoud par itérations, en le linéarisant à chaque étape au voisinage de la solution précédente. Un jeu de valeurs approchées des inconnues est donc nécessaire au départ.

Les paramètres de modélisation, P, A, R, F sont tous pris nuls au départ : ce qui revient à exprimer que la trajectoire fournie en constitue une très correcte estimation.

Restent les points M, qui peuvent être déterminés par triangulation à partir des données des éphémérides, ou par simple interpolation entre points connus. Nos essais nous ont montré qu'une valeur approchée au kilomètre suffit amplement pour effectuer une compensation.

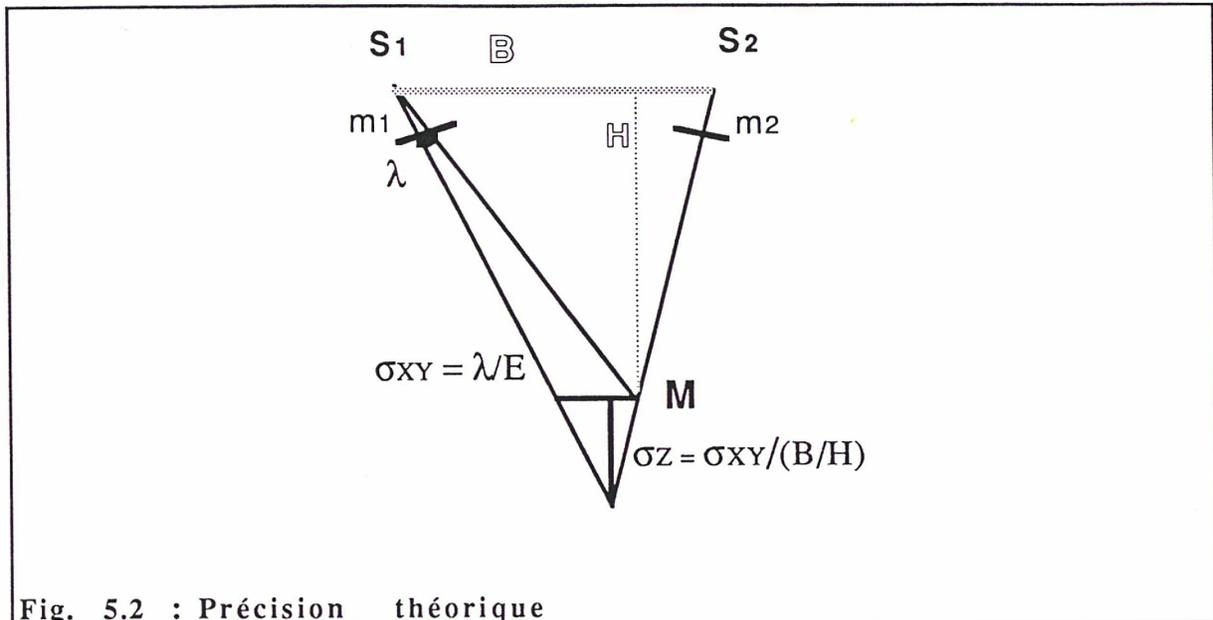
De ces valeurs approchées dépend certainement la vitesse de convergence de la compensation ; cependant ce point n'a pas semblé primordial dans cette étude, où dans tous les cas, 3 itérations s'avèrent suffisantes.

5.4. Précision théorique attendue

En supposant une précision de pointé de $\lambda = 5\mu\text{m}$ - chiffre usuel pour les clichés aériens dont la définition est proche de celle des films Spot - sur des clichés à 1:400000, soit encore 1/5 pixel, la précision de triangulation planimétrique est alors $\sigma_{xy} = \lambda/E = 400000 \cdot 5\mu\text{m} = 2\text{ m}$.

Notant (cf Fig 5.2) $B = S_1S_2$ et H la hauteur moyenne du satellite sur le sol, la précision altimétrique est alors $\sigma_z = \frac{\sigma_{xy}}{B/H} = \frac{2}{B/H}\text{ m}$, soit 4m pour $B/H = 0.5$ (cf ALBATTAH p87-88).

Ce rapport B/H, ou rapport base/hauteur est le facteur principal pour la précision altimétrique, il ne dépend que des angles de visée des segments (ou pas-miroir). Afin d'exploiter au mieux la stéréoscopie, on cherchera des couples de B/H supérieur à 0.8.



Ces chiffres sont les précisions théoriques de triangulation Spot, qui donnent en fait la meilleure précision offerte par le système. On suppose implicitement que le point est parfaitement bien pointé et parfaitement bien défini. Or, dans la pratique, un point est un détail naturel de l'image choisi pour ses capacités à être pointé et, pour un point-terrain, à être déterminé sur le terrain. Le seul moyen d'éviter cet écueil, moyen utilisé en aérotriangulation, est de baliser au préalable la zone de test, ce qui est difficilement faisable pour un chantier Spot, vu la taille des prébalises nécessaires.

En comparant ces chiffres théoriques aux résultats expérimentaux sur points de contrôle, il ne faudra omettre ni la précision d'identification sur les images Spot des détails déterminés sur le terrain, ni la précision de détermination de ces coordonnées de contrôle sur le terrain.

5.5. Nécessité d'ajouter des équations d'information

D'un point de vue théorique et mathématique rigoureux, les équations image, les équation d'appui, et la modélisation de l'orbite devraient permettre de déterminer toutes les inconnues. Cependant, ce n'est pas le cas.

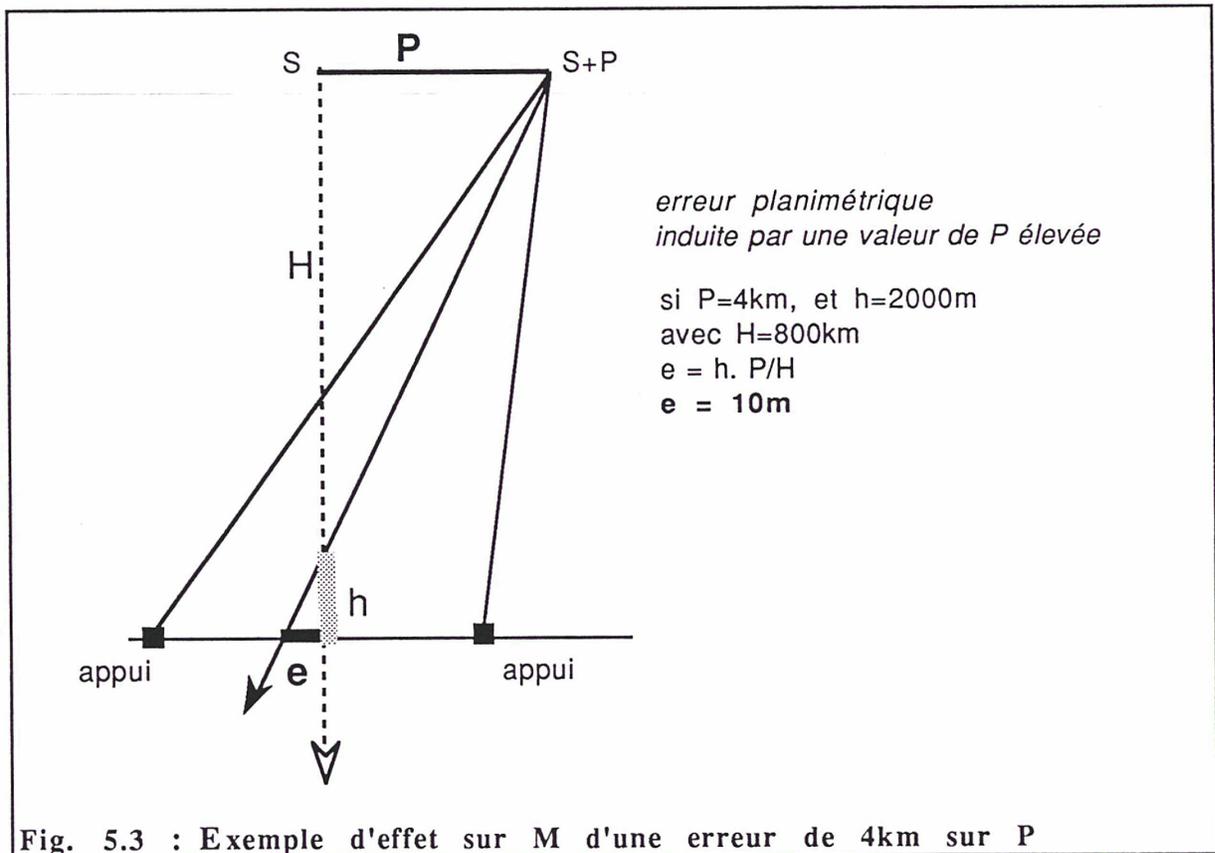
5.5.1. Instabilité

Expérimentalement, la compensation diverge si on ne prend que les équations image et terrain. Les causes se trouvent assez aisément.

Du fait de l'étroitesse (4.12°) du faisceau de prise de vues unidimensionnel, ce modèle résiste fort mal aux erreurs de mesures raisonnables. En effet, et les deux exemples qui suivent le prouvent, une erreur de 5m au sol sur un appui, ce qui entre tout à fait dans les limites raisonnables en la matière, peut entraîner une valeur pour P de 4 km. Cependant, étant données les spécifications, cette valeur ne traduit probablement pas un écart réel à la trajectoire fournie.

Hormis les difficultés de convergence lors du calcul des faisceaux, le problème ne réside pas tant dans un mauvais positionnement/orientement du satellite, mais en fait dans les conséquences d'un mauvais positionnement/orientement du satellite, lors d'une exploitation ultérieure, stéréoscopique en particulier.

Les conséquences d'un écart (ou erreur) de 4 km sur P ne peuvent être négligées.



En effet, dans le cas d'une erreur de 4km sur P (donc sur S), la position restituée d'un point de dénivelée $h=2000\text{m}$ par rapport aux appuis est entachée d'une erreur planimétrique $e = h \frac{4}{800} = 10\text{m}$; et d'une erreur de restitution altimétrique $e_a = H/B(ep_1+ep_2)$, soit 20m pour $h=2000\text{m}$ et $B/H=1$, si les deux faisceaux sont désorientés en sens contraire. Ces valeurs ne peuvent être

négligées. Il faudra remédier à ces effets, en évitant qu'une erreur de 5 m sur un appui ne cause des dégâts à P.

5.5.2. Causes

Nous donnons ici deux exemples d'erreur planimétrique de 5 m, pour le premier le long de la trace, pour le second, perpendiculairement à celle-ci, entraînant chacun un écart e_P de 4 km.

Premier exemple, montrant l'effet possible d'une erreur planimétrique de 5 m sur un appui.

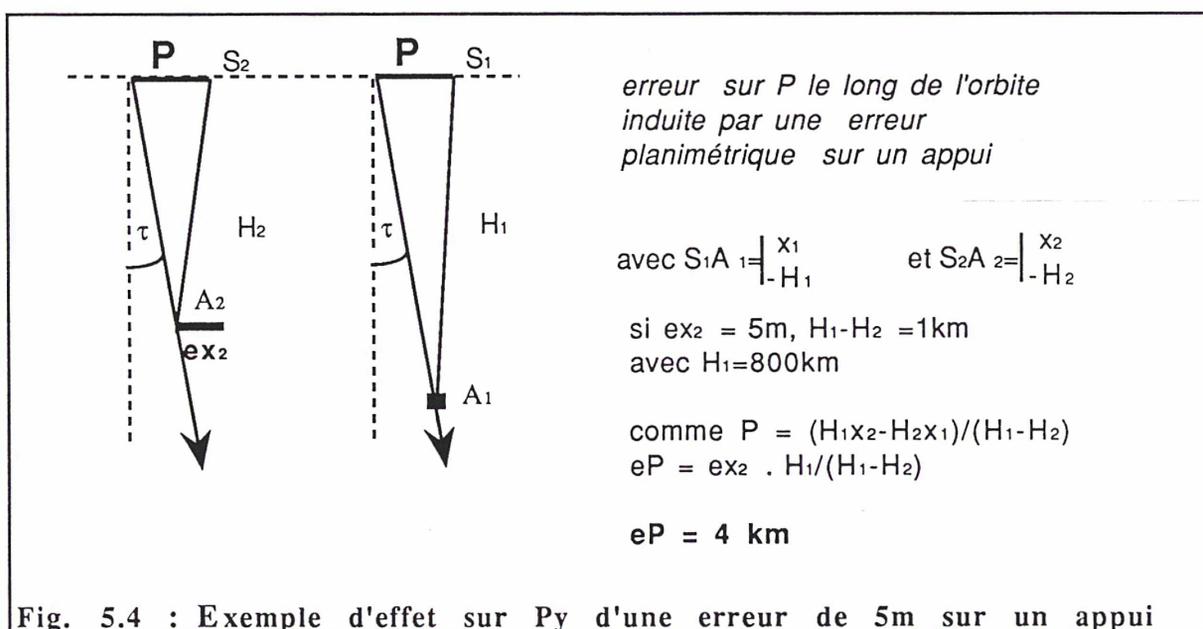
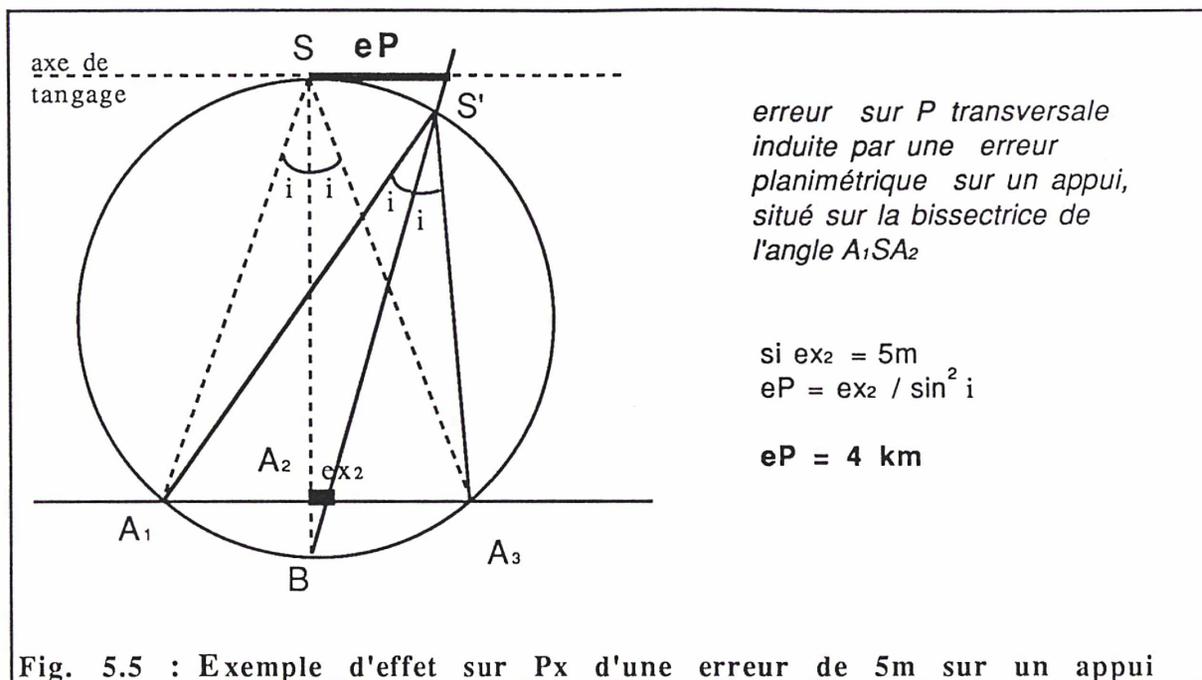


Fig. 5.4 : Exemple d'effet sur P_y d'une erreur de 5m sur un appui

Une erreur planimétrique de 5m sur un point d'appui le long de la trace, (ici ex_2 sur le point A_2) entraîne, si la dénivelée entre les points est de 1km, une erreur de 4km sur P_y et de 5mrd sur A_x .

Deuxième exemple, sur les conséquences sur P d'une erreur planimétrique de 5m sur un appui.



De même, une même erreur de 5m sur le point d'appui A_2 , placé sur la bissectrice de l'angle A_1SA_3 , entraîne une erreur sur Px de 4.1 km et sur Ay de 5mrd (cf JULIEN 90).

5.5.3. Contrainte

Cette instabilité conduit à ajouter une contrainte sur les paramètres de modélisation recherchés. Cette contrainte consiste à intégrer l'information que l'on a que les valeurs recherchées en P sont de l'ordre de $\sigma_P = 300m$, et en A de $\sigma_A = 0.4 mrd$.

On écrit des équations d'observation complémentaires, ou **équations d'information** : $P = 0$ pondérée par σ_P ($V = 0$ pondérée par σ_V) et $A = 0$ pondérée par σ_A , comme exposé ci-dessus en 5.2.2.3.

Le terme de pseudo-observation est également employé, car bien que traitée comme une équation d'observation par les moindres carrés, aucune mesure n'a été faite. Certains préfèrent le terme d'équation de stabilisation du modèle, car elle le rend stable ; le terme d'équation d'information, stabilisant le modèle, sera conservé ici.

Intégrer cette information, c'est tenir compte de la rigidité de l'orbite, ou encore, comme Toutin (cf TOUTIN 85) le dit, que 'un satellite n'est pas un OVNI', et qu'il reste sur son orbite que l'on peut considérer comme rigide. Ne pas en tenir

compte revient à utiliser un outil performant sans en exploiter toutes les qualités.

Il faut noter que ces équations d'information permettent, en outre, de gérer dans un premier temps, la corrélation des inconnues induite également par l'étroitesse du faisceau de prise de vues. La gestion de ces corrélations sera l'objet des chapitres 6.2 et 6.3 ci-dessous.

Certains (cf D'AUTUME 85, KRATKY 88) ont eu une démarche inverse en introduisant des équations d'information d'abord pour gérer la corrélation, assurant d'un même coup la stabilité.

En fait, la corrélation des inconnues et l'instabilité ont les mêmes causes, la prise de vues unidimensionnelle et l'étroitesse du faisceau de prise de vue. En gérant la corrélation par des équations d'information, les deux problèmes sont réglés simultanément. Mais en gérant cette corrélation en supprimant des inconnues rendues inutiles, l'instabilité n'est pas réglée. Je préfère dissocier les deux problèmes, et régler la corrélation autrement.

Enfin, et ce n'est pas si inintéressant, ces équations d'information permettent d'assurer l'existence d'une solution lorsque le nombre de points connus est insuffisant (inférieur à 3), voire lorsqu'il est nul.

6. Compensation de bloc

Après avoir défini un bloc du point de vue du calcul de compensation, les éléments a priori d'un calcul seront exposés. La corrélation de certaines inconnues amènera à en réduire le nombre total. Les valeurs de pondération à introduire termineront ce chapitre.

6.1. Un bloc

Un bloc d'images Spot est un ensemble d'images, connexe, couvrant, a priori en stéréoscopie, une zone donnée. Au delà de ceci, on entend aussi par bloc un ensemble de points observés, ou mesurés sur lesdites images, dont les coordonnées terrain de certains sont déjà connues. Les points d'appui constituent l'équipement du bloc.

6.1.1. Points observés

Les points observés ont des fonctions multiples, bien plus marquées que dans un couple :

La première est **d'assurer les liaisons du bloc** entre scènes adjacentes.

Dans un couple, ipso facto, tout point observé en stéréoscopie est mesuré sur les deux segments et permet d'assurer la liaison entre ceux-ci. Pour un bloc, ce n'est pas le cas.

Qui dit compensation globale d'un système de n équations à r inconnues suppose que ce système forme un tout non partitionnable.

La seconde est **d'être futur point d'appui** d'un des couples du bloc. Ces points ont la particularité d'être localisés dans les couples aux endroits les plus propices à cette future utilisation. Ce sont les points de densification du canevas initialement connu.

La troisième est **d'être connu**, c'est-à-dire d'être un point-terrain, ou encore d'avoir des coordonnées terrain connues, et donc de servir d'appui ou de contrôle au bloc.

En général, tout point de liaison sert aussi de futur point d'appui, et tous sont appelés 'points de spatio', signifiant qu'ils sont déterminés par spatiotriangulation.

6.1.2. Mesures

Chaque point est observé sur toutes les images sur lesquelles il est mesurable. Ceci permet d'augmenter la redondance du système à résoudre.

Un point est vu sur deux images au moins, parfois sur trois ou quatre, éventuellement suivant le bloc sur plus. C'est la principale différence au niveau calcul, par rapport au couple, où tous les points n'étaient vus que sur deux images.

Les mesures peuvent être effectuées soit sur film à l'aide d'un comparateur, mono comparateur ou stéréocomparateur, ou à l'aide d'un appareil de restitution analytique, soit sur image numérique, sur un écran.

Lorsque les mesures exploitées dans cette étude ont été effectuées, il n'était pas possible de faire des pointés stéréoscopiques subpixelliques sur image numérique de points déjà définis (terrain par exemple).

Afin de privilégier la stéréoscopie, les mesures furent faites sur films.

6.1.3. Images

Le bloc est en premier lieu constitué d'images, lesquelles pourront être liées par la mesure de points communs. Il importe que ce pointé ne soit pas trop difficile, et que les images se ressemblent ! Pour cela, des images acquises dans un délai de temps restreint ont de grandes chances de convenir.

L'unité de modélisation retenue est le segment de prise de vues. De ce fait, pour un même nombre de scènes, plus il y a de segments, et moins il y aura d'inconnues, donc meilleurs devront être les résultats de compensation.

Deux segments formant un bisegment ont les mêmes paramètres externes, position, vitesse, attitude. Chacun a son coefficient d'anisotropie. Il faut de plus prévoir une rotation constante R modélisant le biais d'orientation du HRV2 par rapport au HRV1.

6.1.4. Eléments de calcul

Reprenant la modélisation exposée précédemment, les éléments de calcul d'un bloc se déduisent rapidement des éléments de calcul d'un couple (cf 5.2).

6.1.4.1. Inconnues

Les inconnues sont ici :

pour chaque segment,		l'indice α caractérisant un segment
externes :	$P_\alpha^0, P_\alpha^1, A_\alpha^0$, en général	P_α^0, A_α^0 , dans certains cas
internes :	F_α , si un seul HRV en service,	$F1_\alpha, F2_\alpha, R_\alpha$ pour un bisegment
pour chaque point :		l'indice i caractérisant un point
	X_i, Y_i, Z_i	

Tab 6.1 : Inconnues

6.1.4.2. Equations

Image :

$$s_\alpha m_{i,\alpha} // S_{i,\alpha} M_{i,\alpha} \quad \text{pondérées par } \sigma I \quad (2 \text{ équations})$$

Terrain :

$X_j = X_{jT}$	pondérée par $\sigma X Y$
$Y_j = Y_{jT}$	pondérée par $\sigma X Y$
$Z_k = Z_{kT}$	pondérée par σZ

Information :

$P_\alpha^0 = 0$	pondérée par σP (3 équations)
$P_\alpha^1 = 0$	pondérée par σV (3 équations)
$A_\alpha^0 = 0$	pondérée par σA (3 équations)
$F_\alpha = 0$	pondérée par σF si un seul HRV en service

$$\left| \begin{array}{ll} F1_{\alpha} = 0 & \text{pondérée par } \sigma F \quad \text{si bisegment} \\ F2_{\alpha} = 0 & \text{pondérée par } \sigma F \\ R_{\alpha} = 0 & \text{pondérée par } \sigma R \quad (3 \text{ équations}) \end{array} \right.$$

Ces éléments de calcul constituent le schéma de base adopté pour cette modélisation. Cependant, avant tout calcul de compensation, reste à fixer les pondérations des équations et à vérifier l'indépendance de ces inconnues entre elles.

N.B.: afin d'alléger les notations par la suite les trois coordonnées de P_{α}^0 pourront être notées (P_x, P_y, P_z) , celles de P_{α}^1 , (V_x, V_y, V_z) , et A_{α}^0 sera représenté par (A_x, A_y, A_z) .

6.1.5. Compensation

La méthode employée pour la compensation du bloc est exactement la même que pour la modélisation d'un couple (cf 5.3). Pour un bloc, il y a plus d'inconnues, il y a plus d'équations, le système à résoudre est donc plus 'gros', et plus long à inverser.

La mise en place approchée n'est pas un réel problème ici, les paramètres de modélisations de tous les segments sont de même pris nuls au départ. Les positions approchées des points seront calculées comme pour un couple.

Un calcul nécessite 3 itérations minimum. Un habitué des aérotriangulations pourrait s'étonner de tant d'itérations pour assurer une bonne liaison point-satellite. Il faut cependant noter que les valeurs approchées n'ont aucune cohérence entre elles, alors qu'en photogrammétrie aérienne, par le biais des orientations relatives préalables, la cohérence interne est mieux assurée. Cette référence en la matière fournit peut-être une solution approchée très proche, et plus proche, en comparaison, de celle obtenue par les données auxiliaires Spot.

Il n'est pas nécessaire d'avoir des points d'appui, nous l'avons dit (5.5.3). Même lorsqu'on en a, il peut même être commode de procéder à quelques itérations sans les utiliser pour tester la cohérence interne du modèle. On pourrait presque parler d'orientation relative, mais elle n'a pas le sens usuel en photogrammétrie aérienne, et mieux vaut se garder d'associer ces deux phénomènes différents.

6.2. Corrélation des inconnues

Toutes les inconnues retenues sont le reflet de réalités physiques. Cependant, certaines de ces réalités physiques ont des effets similaires au sol, indissociables par une modélisation appuyée au sol. Il y a corrélation entre certaines des inconnues.

Ce phénomène n'entrave pas la convergence de la résolution du système, car les nécessaires équations d'information l'en empêchent. Cependant, il est important de s'y attarder.

La cause essentielle induisant les équations d'information, à savoir, l'étroitesse ($4,12^\circ$) d'un faisceau de prise de vues unidimensionnel, est également la cause des corrélations entre inconnues.

Ces corrélations concernent trois couples d'inconnues, et conduisent à réduire le nombre d'inconnues d'un segment de 10 à 7.

Déplacement le long de la trajectoire (P_y) et tangage (A_x) sont corrélés.

Déplacement transversal à la trajectoire (P_x) et roulis (A_y) sont corrélés.

Déplacement le long de la direction principale de visée (P_z et, en oblique, P_x) et géométrie interne ou 'focale' (F) sont corrélés.

Nous démontrerons d'abord la compensation réciproque des inconnues corrélées, avant d'examiner sur les données expérimentales, les coefficients de corrélation entre inconnues.

Pour démontrer la compensation réciproque entre inconnues corrélées, le principe de démonstration employé pour les trois couples d'inconnues est le même, et se résume ainsi :

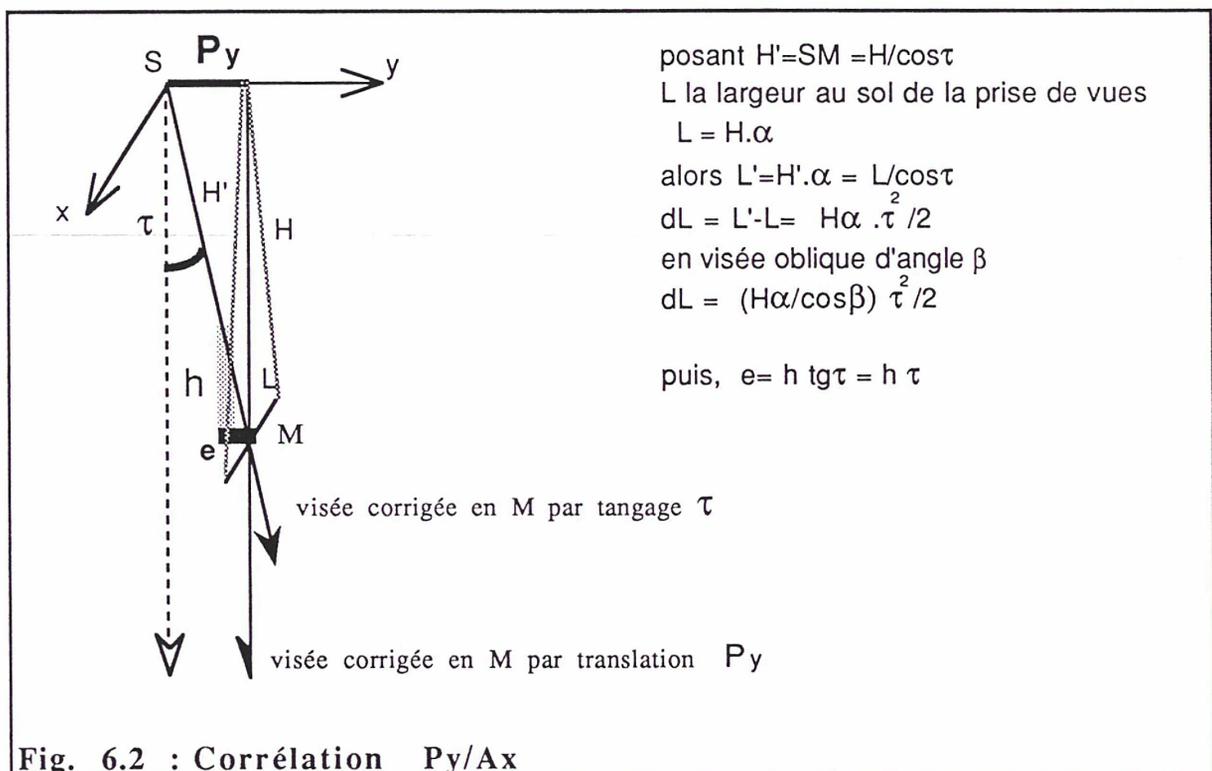
si G et H sont deux inconnues corrélées, donc dont les effets peuvent se compenser mutuellement, on recherchera la valeur maximale de G (ou de H), telle que le défaut de compensation de G par H soit négligeable, donc ici inférieur à 1m au sol ; puis on vérifiera que cette valeur est supérieure à la valeur maximum prévue pour G (resp. H) ; si bien que l'intervalle de variation prévu pour l'inconnue G (resp. H) est inclu largement dans l'intervalle de G (resp. H) où G et H s'équivalent.

6.2.1. P_y/A_x

Déplacement le long de la trajectoire (P_y) et tangage (A_x) s'équivalent.



Soit L la largeur, au sol, du faisceau de prise de vue (60km en visée verticale). On recherche la valeur de tangage telle que L' (due au tangage), diffère de L (due au déplacement) de moins de 1m. C'est l'effet 'en x' du défaut de compensation. Quant à l'effet en y, il n'intervient que sur les points à une hauteur h des appuis.



pour garantir une erreur au sol dL inférieure à 1m

$$\tau^2 < \frac{2 \cdot \cos \beta}{H \alpha}$$

ce qui conduit à $\tau < 5 \cdot 10^{-3}$ rd, ou $P_y = H \tau < 4$ km

ce qui est largement assuré par les spécifications du système Spot donnant $\tau < 7 \cdot 10^{-4}$ rd, ou $P_y < 300$ m.

L'erreur planimétrique induite sur un point de hauteur h au dessus (ou en dessous) des appuis, est $e = h \tau$, soit 2.8 m pour $h = 4$ km.

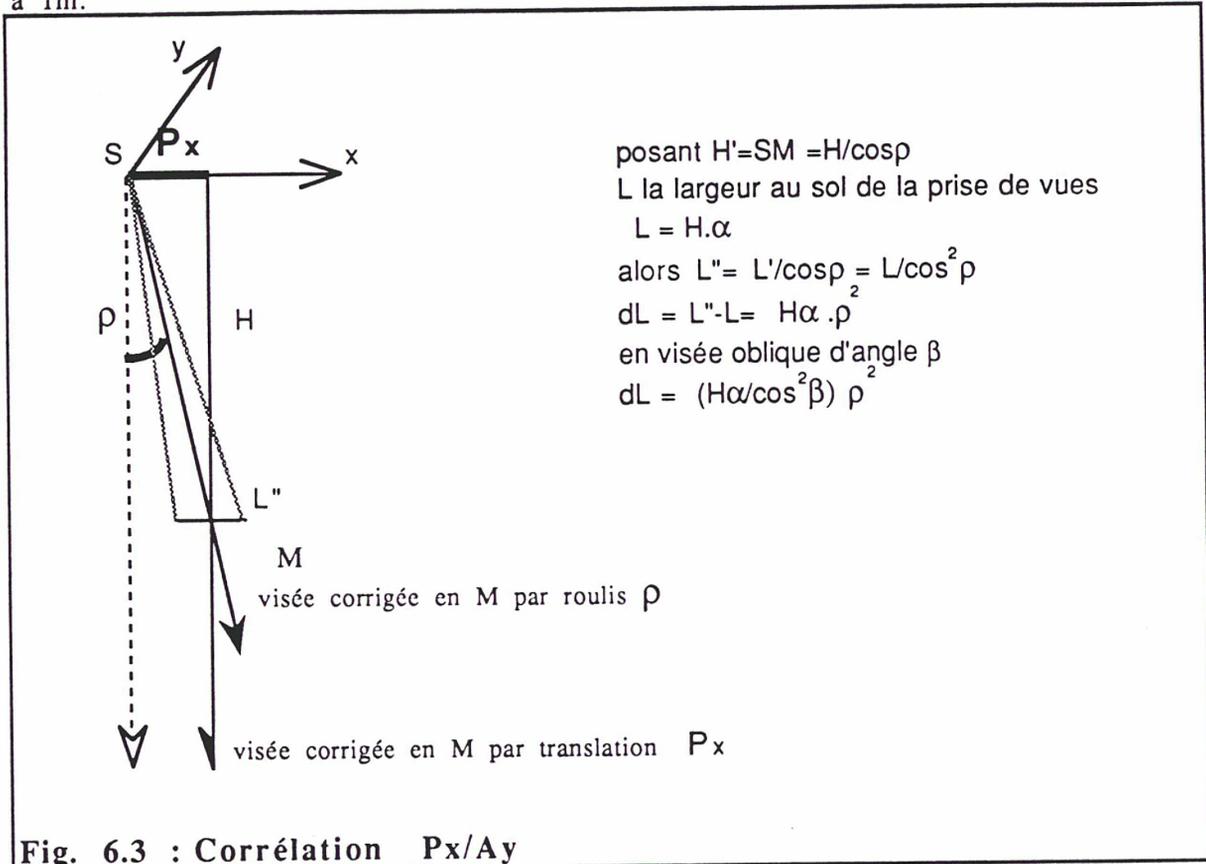
Il est donc inutile d'essayer de déterminer simultanément les deux inconnues.

6.2.2. P_x / A_y

Déplacement transversal à la trajectoire (P_x) et roulis (A_y) s'équivalent.



Ici, l'ensemble du faisceau de prise de vues reste dans le plan xz, on recherche la valeur de roulis impliquant un défaut de compensation en x, ou ($L''-L$), inférieur à 1m.



pour garantir une erreur au sol dL inférieure à 1m

$$\rho^2 < \frac{\cos^2 \beta}{H \alpha}$$

ce qui conduit à $\rho < 2 \cdot 10^{-3}$ rd, ou $P_x = H \rho < 1.6$ km

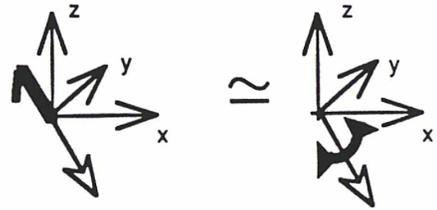
ce qui est assuré par les spécifications du système Spot.

L'erreur planimétrique induite sur un point de hauteur h au dessus (ou en dessous) des appuis, est $e = h \rho / \cos \beta$, soit 4.5 m pour $h = 4$ km.

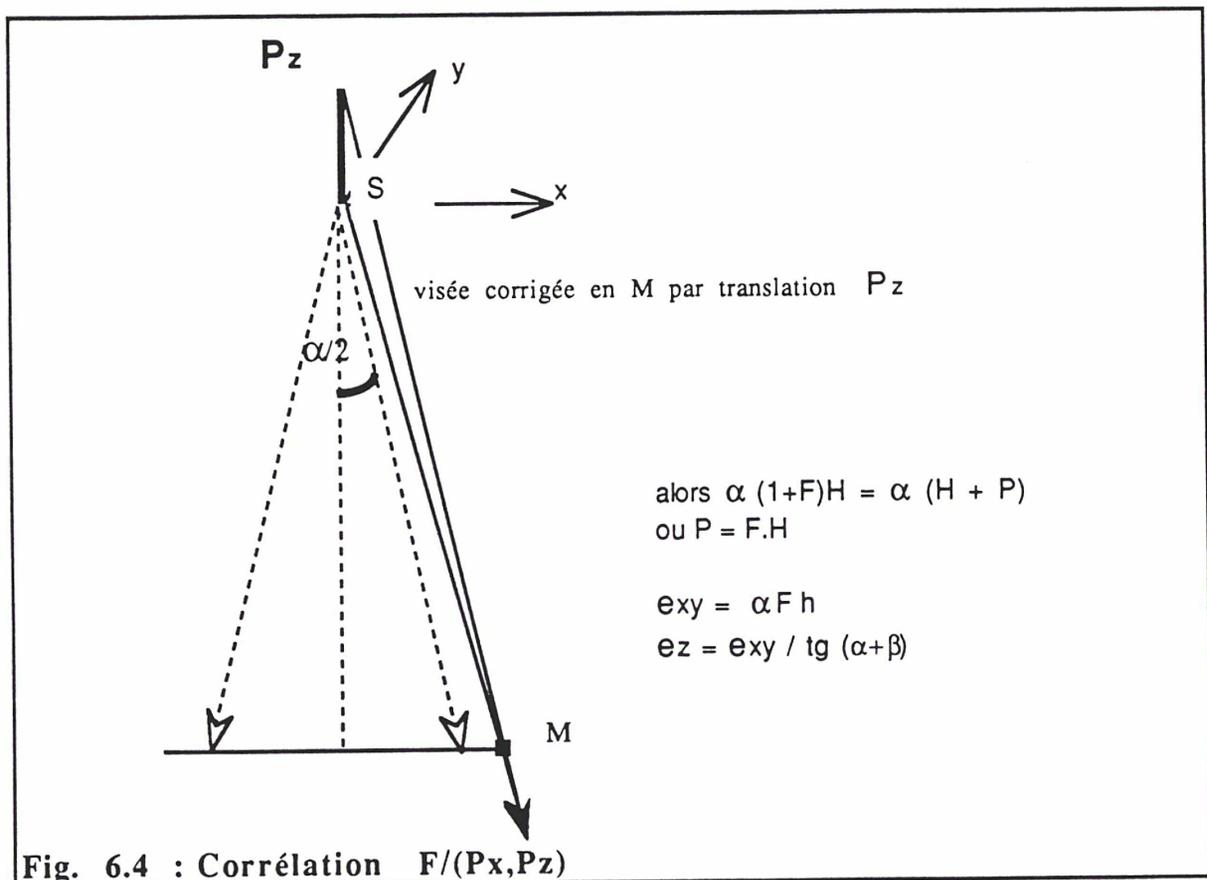
Il est donc inutile d'essayer de déterminer simultanément les deux inconnues.

6.2.3. $(P_x, P_z)/F$

Focale et éloignement le long de l'axe principal de visée s'équivalent



En première approche, avait été retenue l'hypothèse d'une connaissance suffisante de la géométrie interne. F n'étant pas retenu comme inconnue, le problème de ces corrélations ne se posait pas. Cependant, vu le faible angle de champ, focale et éloignement le long de l'axe principal de visée s'équivalent.



Une erreur planimétrique au sol supérieure à 1m de non compensation de F par l'éloignement implique que $F > 4 \cdot 10^{-3}$ ou l'éloignement excède 3.2 km, en visée oblique pour un point situé à une hauteur h de 8km des appuis.

Dit autrement, les deux faisceaux, celui compensé par F et celui compensé par P, sont superposables dans une tranche de hauteur de 8km, à moins de 1m, pour $F > 4 \cdot 10^{-3}$ ou un éloignement excédant 3.2 km. Ces chiffres pour F, ou pour l'éloignement sont supérieurs aux spécifications.

Ce qui lie les inconnues F et Pz en visée verticale et F et (Px,Pz) en visée oblique.

Pour un bisegment, les deux inconnues (différentes a priori) F1 et F2, seraient compensées chacune par un éloignement différent du satellite dans la direction principale de prise de vues du HRV ; en ce cas il conviendrait de ne garder que 3 inconnues parmi les 4 (Px,Pz,F1,F2). Deux choix sont possibles : garder le jeu Px,F1,F2, le jeu Px,Pz,F1 (ou Px,Pz,F2). Une certaine symétrie, concernant les inconnues liées à chacun des deux faisceaux d'un bisegment, semble de mise. Ainsi, il serait plus satisfaisant de garder le jeu Px,F1,F2, que le jeu Px,Pz,F1(ou bien F2).

6.2.4. Examen des coefficients de corrélation

L'examen des coefficients de corrélation d'un bloc à partir de l'inverse de la matrice normale réduite est un autre moyen de déceler les corrélations entre inconnues.

6.2.4.1. Principe

Dans une compensation par moindres carrés, où x est inconnue de $Ax=L$, en notant x_c la solution compensée, la variance de x_c , vérifie $\sigma^2 x_c = (A^T p A)^{-1} \cdot \sigma^2_0$. Or $\sigma^2 x = E(x - Ex)^2$ a pour terme général $q_{ij} = E(x_i - Ex_i)(x_j - Ex_j) = \text{covariance de } x_i \text{ et } x_j$. Enfin $r_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sigma_{x_i} \sigma_{x_j}} = \text{coefficient de corrélation linéaire de } x_i \text{ et } x_j$.

Nous définissons ici la matrice C comme suit :

si N est l'inverse de la matrice normale $N=(A^T p A)^{-1}$,

alors, pour $i \neq j$, $c_{ij} = \frac{n_{ij}^2}{n_{ii} \cdot n_{jj}} \times (\text{signe de } n_{ij})$, et $c_{ii} = n_{ii}$.

Ceci implique que, $\sqrt{|c_{ij}|} \times (\text{signe de } n_{ij})$, est un estimateur de r_{ij} , coefficient de corrélation des inconnues i et j.

6.2.4.2. Résultats

Cette matrice C a été calculée sur le bloc ADEF, offrant la plus grande régularité tant en terme d'équipement, qu'en matière de segments. Elle occupe le tableau A7.1.

Si toutes les inconnues sont conservées, lorsque tous les points sont en appui, les valeurs (absolues) des termes non nuls de la matrice C, dont les valeurs sont quasi-identiques pour chacun des 8 segments sont les suivants :

$$c(Py,Ax) = 1. \quad c(Px,Ay) = 1. \quad c(Pz,F) = .6 \quad c(Px,F) = .3 \quad c(Ay,F) = .3$$

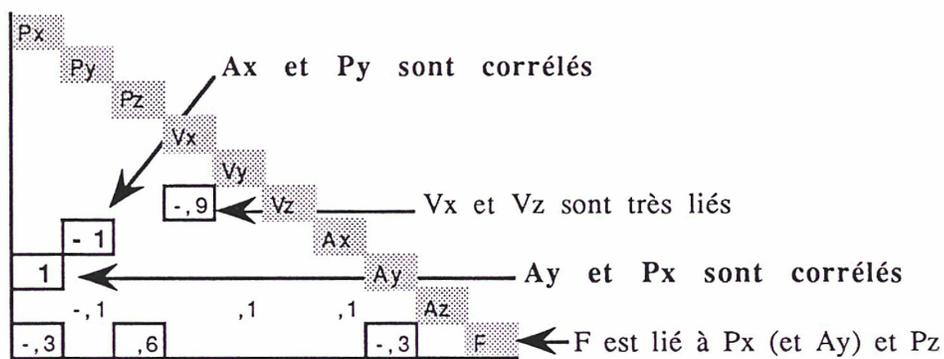
$$c(Vx,Vz) = .9$$

On note également une corrélation entre V_x et V_z , paramètres de dérive perpendiculairement à la trajectoire, dont le signe du terme $n(V_x,V_z)$ dépend de la direction de visée : positif pour une visée vers l'ouest et négatif pour une visée vers l'Est.

Je l'expliquerai par le fait que seule une dérive d'éloignement le long de l'axe de visée aurait un effet au sol.

En supprimant les trois corrélations principales, (P_x/A_y , P_y/A_x , F/P_xP_z), il reste (cf A7.1) un lien entre F , V_x et V_z : $c(V_x,F) = .1$ $c(V_z,F) = .1$

Nota : ceci est extrait de la matrice complète située en Annexe 7, et donne les valeurs des coefficients non nuls de la matrice C pour un segment oblique (ce qui explique que F et P_x soient liés)



Tab 6.5 : Matrice de corrélation entre inconnues

Enfin, entre les deux segments d'une même bande, il y a un lien entre les vitesses le long de la trajectoire, $c(V_{y1},V_{y2})=.1$, d'une part, et entre les lacets, $c(Az1,Az2)=.1$, d'autre part. Ceci peut s'expliquer.

Ces chiffres confirment sur un exemple les corrélations précédemment démontrées.

6.3. Modélisation retenue

6.3.1. Pourquoi F ?

Justification de l'introduction d'une inconnue de focale

N'ayant pas, initialement, remis en cause la géométrie interne du capteur, ou encore sa focale (au sens large : focale + taille des détecteurs), c'est en observant un systématisme sur les valeurs trouvées pour P_z , et une corrélation entre P_x et P_z , qui montrait le point S "glissant" le long de la direction principale de prise de vues, que la géométrie interne fut mise en cause, et qu'une recherche de la valeur de focale dans différents documents fut menée, conduisant aux conclusions annoncées en 3.4.

Une recherche du choix fait à ce sujet, par d'autres modélisations Spot, présentées au chapitre 8, débouche sur les mêmes difficultés.

Certains, (ALBATTAH 89, LEE 88), ayant remarqué un systématisme compensable par un facteur d'anisotropie, ont ajouté ce type d'inconnues. Une des raisons invoquées repose sur les films qui, étant insolés par ligne sur un cylindre, pourraient présenter une anisotropie de ce fait.

Kratky (KRATKY 88) a introduit une inconnue de focale. De Haan (HAAN 91) a remis en cause, outre la focale, les valeurs de ψ fournies.

Priebbenow (PRIEBBENOW 89) a choisi de ne pas introduire ce type d'inconnues.

De plus, l'examen des corrélations d'un bloc, montre une corrélation entre les F du HRV 1 d'une part, et 2 d'autre part, sans corrélation entre eux (cf annexe 7). Ce qui peut être la conséquence d'une même cause physique à toutes les inconnues F1 d'une part, et à toutes les inconnues F2 de l'autre. Ce qui tend vers l'hypothèse d'une valeur de focale imprécisément connue.

6.3.2. Critères de choix

Ces corrélations montrent que parmi les 6 inconnues (P_x , P_y , P_z , A_x , A_y , F) trois suffisent. Lesquelles garder ?

Plusieurs critères se présentent :

- . garder la modélisation qui donne les meilleurs résultats terrain (exactitude de triangulation).
- . garder la modélisation qui donne les meilleurs résultats sans point d'appui, qui dégradent le moins le bloc en l'absence de points d'appui.

- . garder les inconnues les plus significatives, i.e. correspondant à l'effet le plus important.
- . garder la modélisation qui conduit à la compensation la plus rapide

L'examen des causes de ces corrélations effectué ci-dessus (en 6.2.) ne peut permettre de décider (sauf pour le choix F/Pz dans le cas d'un bisegment).

6.3.2.1. Exactitude

C'est le premier critère auquel on pense. Rien de très significatif n'est apparu entre les différentes modélisations possibles. De plus, un nombre restreint de blocs de données expérimentales ne peut apporter de conclusions définitives, uniquement des tendances.

Cependant, ce critère fut employé au tout début. Pour les premiers essais, qui ne comportaient pas d'inconnue de focale, celle-ci étant supposée correcte, parmi les 4 modélisations : P_x, P_y, P_z, A_z P_z, A_x, A_y, A_z P_y, P_z, A_y, A_z P_x, P_z, A_x, A_z , c'est la dernière qui apparut la "meilleure" sur un bloc de test, en donnant des écarts moyens quadratiques terrain (sur un nombre élevé de points d'appui) les plus faibles. Elle fut retenue dans un premier temps.

Une explication ne vint qu'ultérieurement. En raison de l'imprécision sur la focale, non prise en compte explicitement par ces modélisations, donc, par le biais des corrélations absorbées par les inconnues P_x et P_z , P_x semble aussi représentative que A_y , voire plus. Comme on le verra ci-dessous, A_x est plus représentative que P_y . D'où, une raison au choix de P_x et A_x au détriment de P_y et A_y .

6.3.2.2. Précision sans appui

Un deuxième critère serait de retenir une modélisation qui dégrade le moins possible la précision du bloc en l'absence d'appui. Ceci privilégie la cohésion interne du modèle. L'argument est en fait le suivant : si un bon résultat est obtenu sans appui, le modèle peut ne pas être incorrect.

C'est en cherchant à exploiter ce critère que j'ai été conduite à ajouter une inconnue de focale.

Les résultats des essais, présentés en annexe, n'ont servi qu'à confirmer le choix ultérieur, pas à faire ce choix. Aucune conclusion, en matière de choix d'inconnues n'en est sortie. Ceci se comprend. Ce critère est plus un critère de validation de la modélisation (P,A), mais pas de décision entre deux inconnues ayant les mêmes effets.

6.3.2.3. Signification physique

Le troisième critère, est de garder les inconnues qui sont physiquement les plus significatives, c'est à dire ici causes des effets les plus importants. c'est l'argument le plus rigoureux.

Le raisonnement en est le suivant : Si les inconnues G et H sont quasi entièrement corrélées, si G entraîne plus d'effets que H, mieux vaut garder G et supprimer H, que de transférer sur H les effets causées par G. Il restera que la valeur de G calculée traduira des causes dues à G et à H, certes plus à G qu'à H, mais à H aussi.

Il faut d'abord établir la correspondance, à effet égal au sol, entre les valeurs : 300m en P équivaut à $400\mu\text{rd}$ en A, ou encore 4.10^{-4} sur F.

En P la valeur donnée (à 3σ , donc maximale) est 100m, soit $125\mu\text{rd}$, ou $1.2 \cdot 10^{-4}$.

Pour A les angles maximaux observés sont pour tangage et roulis de $700\mu\text{rd}$.

Pour F, la valeur maximum attendue par construction serait 5.10^{-4} .

Ces chiffres montrent immédiatement que la translation du satellite a moins d'effets qu'attitude et géométrie interne, en d'autres termes, Ax, Ay et F sont plus significatives que Px, Py et Pz.

Les inconnues à retenir sont donc Ax (au détriment de Py), Ay (au détriment de Px) et F (au détriment de Pz, et Px).

La cause translation transversale à la trajectoire (Px) sera modélisée par F et Ay. ce qui lie ces inconnues.

6.3.2.4. Rapidité

Ce quatrième critère privilégie la modélisation qui converge le plus rapidement. Il n'a pas été retenu dans cette étude.

De plus, raisonner de la sorte (cf ALBATTAH 89) sur quelques jeux de données, loin d'être parfaits, semble délicat. Le nombre d'itérations effectuées lors d'un

calcul de bloc est lié à la recherche des fautes de mesure. Gagner une itération, pour passer de 4 à 3 (ou de 3 à 2), soit 2mn (pour un bloc de 3000 mesures), n'est pas critique dans ce type de travail. Cela pourrait, certes, le devenir pour un gros bloc sans fautes, mais un bloc sans faute, c'est extrêmement rare, malgré tout le soin apporté aux observations.

6.3.2.5. conclusion

Tout ceci conduit à déclarer A_x , A_y , et F plus significatives que P_x , P_y et P_z , et à les retenir comme jeu d'inconnues non corrélées.

Ce choix pour un segment convient parfaitement (au sens des remarques du 6.2.3) pour un bisegment, pour lequel A_x , A_y , F_1 et F_2 seraient gardés.

6.3.3. Paramètres retenus et conséquences

Les paramètres retenus sont donc A_x , A_y , A_z , F , plus V_x , V_y , V_z , sauf cas extrêmes. Reprenant les notations initiales du 6.1, les inconnues pour chaque segment sont :

pour le segment α :	
externes :	
P_α^1, A_α^0 , en général	A_α^0 uniquement, dans certains cas
internes :	
F_α , si un seul HRV en service,	$F_{1_\alpha}, F_{2_\alpha}, R_\alpha$ pour un bisegment
Tab 6.6 : Inconnues retenues	

Dans la pratique, ne pas retenir l'inconnue P , c'est la garder mais en écrivant $P=0$, pondérée par $\sigma P/10$. ; car il est plus aisé pour un programme expérimental de modifier la valeur d'un paramètre, que de modifier le nombre d'inconnues. En revanche, quand V est supprimée, elle l'est vraiment.

Ce qui donne donc , en nombre d'inconnues (utiles) par segment :

Modélisation	segment	bisegment	inconnues retenues	
0 brute	10	14	toutes inconnues	P V A F (R)
1 minimale	4	8	sans P, sans V	A F (R)
2 normale	7	11	sans P, avec V	V A F (R)

Tab 6.7 : Nombre d'inconnues par segment

Le choix des paramètres suscite quelques remarques sur la signification des valeurs calculées pour les paramètres retenus;

En reprenant l'exemple de deux inconnues G et H corrélées, un calcul où G et H sont gardées en inconnues donnera comme résultats Gc et Hc, dont les causes sont dues pour chacun des deux et à H et à G. En d'autres termes, ces valeurs calculées Gc et Hc ne signifient pas que dans la réalité, G est en Gc ou H en Hc.

Ne garder qu'une des deux inconnues, et si possible la plus significative, permet de marquer cette ambiguïté.

Les valeurs calculées pour Ax, Ay et F, intégreront les effets de Ax, Ay et F et respectivement de Py, Px et Pz. Ou encore, vu les corrélations entre inconnues, il n'est pas possible de discerner au sol un déplacement du satellite d'une rotation d'attitude de celui-ci ; il n'est possible d'estimer ni le déplacement, ni l'attitude du satellite.

On peut modéliser le faisceau de prise de vues, mais on ne modélisera pas la trajectoire réelle, au sens des éléments physiques réels de la prise de vues. Comme ce qui compte, ce n'est pas la trajectoire réelle de Spot, mais c'est le sol, car l'objectif final est bien de déterminer des points au sol, ceci n'apporte aucune restriction au résultat final.

Par ailleurs, ce choix montre, ipso facto, qu'une connaissance précise de l'orbite ne diminue pas directement le nombre d'inconnues. Nonobstant, une connaissance précise de l'orbite permettra de dissocier les inconnues corrélées et d'estimer les valeurs d'attitude à prévoir, et d'étalonner F.

Un autre choix alors possible d'inconnues serait de retenir les quatre angles ψ donnant les directions de visée des détecteurs extrêmes dans le repère attitude. Il s'agit d'une approche légèrement différente, ne cherchant pas à évaluer les causes physiques, mais les modifications à apporter aux directions de visée extrêmes pour les modéliser. Dans ce cas trois de ces angles devraient être

recherchés linéaires en temps pour intégrer des effets de dérive en vitesse du satellite. Cette approche permet mal de gérer les bisegments.

6.3.4. Qu'apporte la gestion de bi-HRV ?

Suite à ces remarques, il est possible de s'interroger sur l'apport de la modélisation d'une prise de vues bi-HRV, comme bisegment plutôt que comme deux segments.

Le tableau ci-dessous chiffre pour la modélisation retenue (n°2 ou n°1), le gain en nombre d'inconnues d'une gestion de bisegments.

Modélisation	2 segments	bisegment	gain
0 brute	$2 \times 10 = 20$	14	6
1 minimale	$2 \times 4 = 8$	8	0
2 normale	$2 \times 7 = 14$	11	3

Tab 6.8 : Inconnues par bisegment

L'intérêt , a priori, pour une modélisation 'brute', marqué par un gain de 6 inconnues, est modéré à un gain de 3 pour une modélisation 'normale', et devient nul pour une modélisation 'minimale'. Trois inconnues de plus ne nécessitent qu'un point d'appui planimétrique de plus.

Au delà du nombre d'inconnues uniquement, la gestion de bisegment permet de prendre en compte la réalité de la prise de vues, en exploitant toute l'information relative à celle-ci.

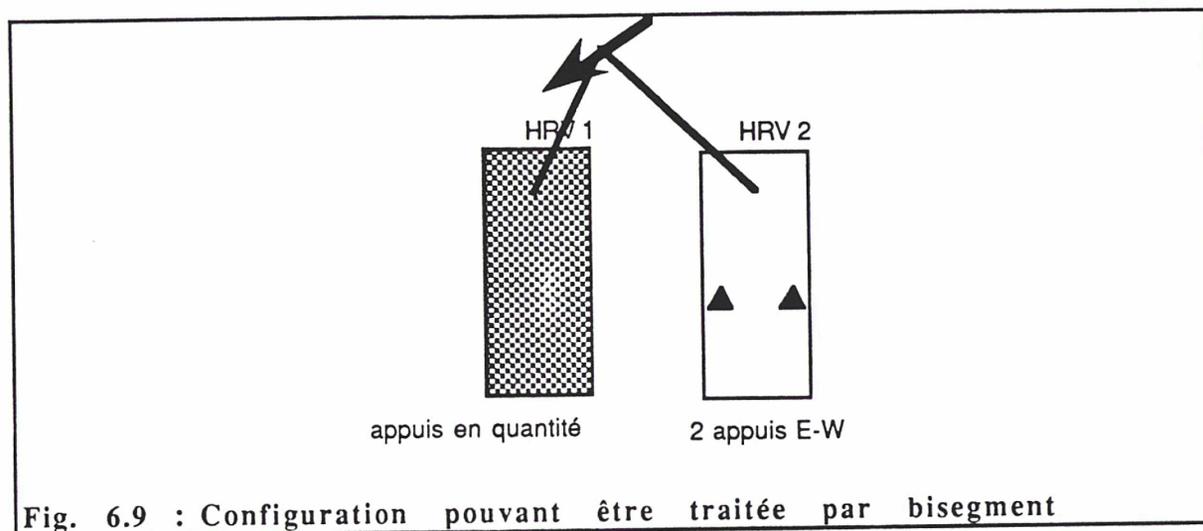
Par exemple, si le biais inter HRV est effectivement inférieur à l'attitude, le positionnement relatif des deux segments sol en sera amélioré.

Malheureusement, ces vérifications n'ont pu être effectuées sur les données disponibles, car les blocs avec bisegments ne disposent pas de point terrain correct sur les deux traces au sol (le hasard a voulu que l'une seulement des deux traces soit bien équipée !).

Ce n'est que si le biais (R) et la focale (F) sont connus parfaitement, qu'il y a autant d'inconnues pour un segment que pour un bisegment. Là, la question ne se pose plus, il faut gérer le bi-HRV.

En l'état actuel, un avantage du bi-HRV géré en tant que tel, est le type de configuration suivante, où l'un des segments est bien équipé (ce qui permet la

détermination de ses 7 paramètres), et l'autre juste assez pour évaluer les 4 paramètres (F et R) de liaison inter HRV (2 points E-W minimum).



6.4. Pondération

Comme pour toute compensation par moindres carrés de mesures hétérogènes, le problème des poids s'est posé. Quelles valeurs introduire dans le calcul pour pondérer les différentes équations d'observation ?

Quelles valeurs attribuer à σ_I , σ_{XY} , σ_Z , σ_P , σ_V , σ_A , σ_R , σ_F , mentionnées ci-dessus ? Certes, une évaluation des précisions attendues de chaque groupe d'observations est connue. Mais ces valeurs ne sont pas les variances de chaque catégorie d'observations.

Nous nous intéressons ici à la **précision** de chaque catégorie d'observations (un estimateur de la variance), à la façon dont elles sont dispersées, et non à l'**exactitude**, ou écart à une donnée de référence.

Nous cherchons comment pondérer les équations pour obtenir la solution des moindres carrés la plus précise, et non à évaluer l'exactitude de la solution fournie. En effet, l'exactitude qui nous intéresse le plus dans le cadre de cette étude est l'exactitude de triangulation de points, que nous évaluerons à l'aide de points de contrôle nombreux dont nous disposons sur le principal jeu test.

Une étude plus détaillée des exactitudes résultantes d'une compensation de bloc serait utile pour fixer des spécifications, ou standards, de qualité, puis pour estimer la qualité d'une compensation Spot donnée au regard de ces spécifications.

6.4.1. Trois groupes d'observations

Les équations d'observation se répartissent en trois groupes, eux-mêmes subdivisés.

Le premier est constitué des mesures sur les images (n°ligne, n°colonne), ou (xy cliché). Les mesures en ligne et en colonne pourraient être considérées de types différents.

Le second est formé des relations terrain, pour les points d'appui (en XYZ, en XY ou en Z). Ces relations sont de deux types: planimétrie et altimétrie.

Le troisième rassemble les équations d'information, ou équations de rigidité, ou équation de stabilisation de la trajectoire. Les informations de position, et les informations d'attitude, formant deux, voire six, groupes distincts.

Pour chacun de ces groupes d'observations, seront d'abord rappelées les grandeurs données a priori, puis examinés les écarts moyens quadratiques de compensation. La pondération adoptée sera enfin exposée, après contrôle par une méthode de détermination de la précision d'observations hétérogènes.

6.4.2. Mesures :

6.4.2.1. Données a priori

La précision de mesure sur film photographique est une donnée relativement bien estimée en photogrammétrie. Elle comprend une part due à l'appareil de mesure lui-même, et l'autre due au pointé du détail par l'opérateur; 5 à 6 microns sont courants. Ramenée aux films Spot utilisés, où 1 pixel = 25 µm, elle correspond à 1/4 pixel Spot Panchromatique.

La mesure sur film photographique d'images Spot ne semble pas gênée par la "pixellisation" de l'image; et en particulier pour le pointé stéréoscopique. L'expérience acquise jusqu'à aujourd'hui ne l'a pas contredit. La comparaison des mesures (Cf Tab 6.9), entre film XS (pixel 50 µm) et film P (pixel 25 µm), par le résidu moyen quadratique de compensation, donne des chiffres équivalents, une fois ramenés au pixel image.

En traitement d'image, le chiffre de 1/4 pixel est donné pour le pointé (en x et en y) sur écran d'un détail bien défini (Cf WESTIN 1991 entre autres); soit 1/3 en xy.

6.4.2.2. Examen des RMQ

Le calcul des RMQ (où RMQ = moyenne quadratique non pondérée des résidus de mesures) sur les blocs d'essais (cf Tab 6.10) a fourni globalement les chiffres suivants : résidus inférieurs à 1/5 pixel en x et à 1/3 en y.

		rmq x rmq y rmq xy			rmq x rmq y rmq xy					
		en 10-6			en pixel					
KETIR	P	2,6	3,4	4,3	0,22	0,28	0,36	bloc	films	parallaxe
ADEF	P	2,4	3,9	4,6	0,20	0,33	0,38	bloc	films	parallaxe crois.
DJI	P	1,9	3,2	3,7	0,16	0,27	0,31	bloc	films	
OEEPE	P	2,3	3,8	4,4	0,19	0,32	0,37	bloc	films	parallaxe crois.
OEEPE 49	P	1,4	3,1	3,4	0,12	0,26	0,28	couple	films	parallaxe crois.
OEEPE 50	P	1,5	3,3	3,6	0,13	0,28	0,30	couple	films	parallaxe crois.
OEEPE 50	P	0,2	2,4	2,4	0,02	0,20	0,20	couple	numérique	
IRAN	XS	3,3	6,7	7,5	0,14	0,28	0,31	bloc	films	

on trouvera en annexe les caractéristiques détaillées des blocs référencés en première colonne
on trouvera en 6.4.2.3 le détail des mentions marginales.

Tab 6.10 : Résidus Moyens Quadratiques des mesures image

L'examen de ces chiffres, confirme sur Spot des résultats habituels en photogrammétrie aérienne ; les meilleurs résidus par couple que par bloc (car il y a moins de contraintes notamment en x).

L'examen de ces chiffres, confirme sur Spot des résultats habituels en photogrammétrie aérienne ; les meilleurs résidus par couple que par bloc (car il y a moins de contraintes notamment en x).

Les problèmes des mesures sur certains films ne dégradent pas trop les résultats (0.4 pixel contre 0.3 pour les blocs).

Le chiffre de **1/3 pixel pour le résidu image d'un bloc** est le chiffre à conserver.

Le pointé sur image numérique, épargné par les incidents de nos mesures sur films, donne des résidus meilleurs, ce qui confirme nos hypothèses. La valeur de 0.02 en x est attribuée au fait qu'il ne s'agit que d'un couple ; malheureusement aucune mesure numérique sur bloc n'est disponible.

6.4.2.3. Dissymétrie entre x et y.

Les explications possibles à cela :

.1. Le nombre de points de liaison transversale (E-W) est faible (nul pour un couple) devant le nombre de points homologues mesurés uniquement sur un couple. D'où la mention "bloc/couple" en marge du tableau.

.2. Pour certaines données d'essais, le processus de mesure employé sur le Traster (cf annexe 7) n'a pas permis d'annuler la parallaxe transversale au modèle (le long de la trace), d'où des résidus de mesure plus forts en y qu'en x. D'où la mention "parallaxe" en marge du tableau.

.3. De plus, un défaut, dû aux croisillons-repère, dans la transformation microns clichés/ligne-colonne a induit des erreurs en y non compensables par le modèle. D'où la mention "crois". en marge du tableau.

.4. Le modèle lui-même, imposant des contraintes plus importantes le long de la trajectoire, il est normal que les résidus y soient plus forts. La contrainte d'échelle en y est donnée par le paramètre V_y , ou $1.6 \cdot 10^{-4}$ (cf 3.5.1), tandis que la contrainte en x est donnée par F ou $5 \cdot 10^{-4}$ (cf 3.4.2).

Les valeurs Iran, où les mesures n'ont pas de raisons d'être faussées en y, pour les causes 1, 2 et 3, donnent 1/8 en x et 1/4 en y (soit 1/3 pixel en xy). Preuve d'une dissymétrie non originale uniquement de défaut d'expérimentation.

6.4.3. Relations terrain

Les poids a priori correspondent à 1/2 pixel, soit 5 mètres.

La précision d'une relation terrain est pour partie issue de la qualité de la détermination (externe) des coordonnées d'appui et pour partie issue de l'aptitude du point à être identifié et pointé.

Tous les résultats de calcul (cf 7) confirment les chiffres annoncés pour l'exactitude des points, de moins de 10 mètres en planimétrie et de 4 à 8m en altimétrie.

Il est prévu de pondérer différemment les relations en Z, dont la précision est liée au B/H, et les relations de planimétrie en X ou en Y.

6.4.4. Equations d'information

Là, des données de précision sont fournies aux utilisateurs Spot (Cf CNES 1986). Elles concernent précision et attitude du satellite et ont été déterminées expérimentalement lors de la recette en vol du système.

Les valeurs (cf 3.5) permettent de donner $\sigma_P=30m$, $\sigma_V=1.1m/s$ et $\sigma_A = 400\mu rd$.

Pour le biais entre HRV d'un bisegment, non précisé encore, les spécifications donnent $300\mu rd$, sur la valeur de la visée oblique, intégrée dans le roulis, sur un segment, mais intégrée aussi dans le biais inter HRV d'un bisegment,. Par ailleurs, une matrice de biais inter HRV sur 12 scènes calculée lors de la recette en vol, montre sur le lacet (dérive maximale), -2.1 mrd de moyenne et 1.8 mrd d'écart-type. Dans le doute, la valeur adoptée pour A est reprise pour R, soit $400 \mu rd$.

Les valeurs utilisées en premier lieu étaient $\sigma_P = 300m$ et $\sigma_A = 400\mu rd$., car les éphémérides se sont révélées plus précises que prévu pour estimer P.

Malheureusement, étant donné la corrélation de certaines de ces inconnues, quand une seule des deux est retenue, et c'est notre cas, quelle précision attribuer à la valeur angulaire (ou de position) obtenue, pour modéliser une grandeur modélisant à la fois une rotation et une translation ?

6.4.5. Pondération adoptée

Toutes ces valeurs annoncées pour la précision nécessitent une certaine vérification. C'est pourquoi, le choix des poids a été effectué après contrôle sur données réelles.

Nous avons cherché à employer une méthode de définition intrinsèque des pondérations à adopter. Ce problème est fort complexe.

Notre critère dans cette étude reste l'**exactitude de triangulation, évaluée sur un nombre élevé de points de contrôle**. Les essais présentés ci-dessous sont plus une tentative d'emploi d'une méthode.

6.4.5.1. Méthodes de contrôle

Diverses études ont été menées sur le sujet de la pondération de mesures hétérogènes, en général, sans s'attacher au problème Spot en particulier. C'est toujours un sujet important de recherches. Deux d'entre elles ont attiré notre attention lors de cette étude.

L'une d'entre elles a pour but d'évaluer l'exactitude en photogrammétrie analytique (Cf KOPLIKU 90). Une méthode rigoureuse est proposée pour estimer sans biais, les variances des différents groupes d'observations dans une compensation hétérogène. Cette étude est valable dans le cas où le phénomène physique est quasi parfaitement modélisé (peu de systématismes).

Notre cas est un peu différent et nous n'avons pas poussé plus loin l'application de ces méthodes, d'autant plus qu'elles nécessitent une part importante d'aménagements du programme de compensation. C'est dans cette direction qu'il faut aller estimer ces variances.

L'autre étude (Cf MILLION 91) a été menée dans un cas plus proche du nôtre, il s'agit de l'apport de mesures embarquées (GPS) à une aérotriangulation de bloc. Mais le problème de cette étude était plus complexe, à savoir, comparer les précisions de compensation avec, ou sans, le troisième type de mesures.

La méthode proposée consiste à relâcher considérablement les contraintes de tous les groupes excepté l'un d'entre eux, à effectuer une compensation, et à utiliser les résidus moyens quadratiques sur ce groupe comme estimateur de sa variance.

Nous avons choisi cette méthode pour sa rapidité de mise en oeuvre. Il suffit en effet de modifier les pondérations des groupes de mesures et de calculer des moyennes quadratiques.

Cette méthode a l'avantage de présenter clairement les deux notions différentes d'exactitude et de précision.

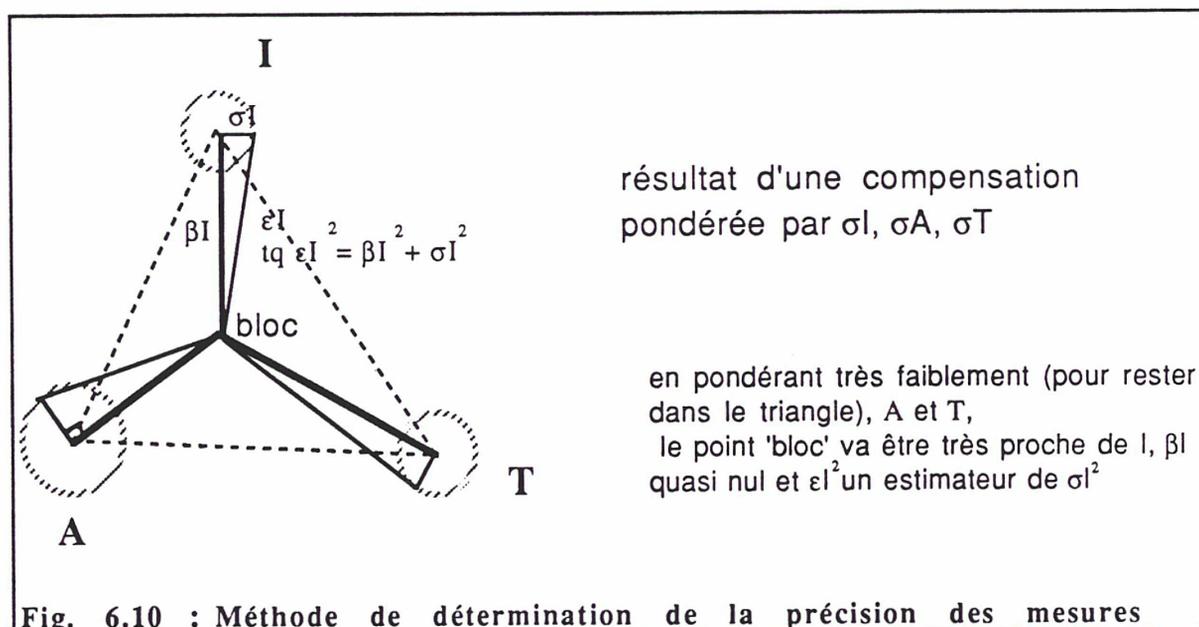
Le schéma ci-dessous donne une idée de la méthode, dont l'analogie mécanique est très accessible. Considérons trois groupes de mesures I, T et A; le calcul le plus précis de compensation de ces mesures hétérogènes s'obtient en pondérant chacune des mesures par sa précision. Soient donc:

- σ_I , la précision des mesures I,
- β_I , le biais sur les mesures I, apporté par les contraintes exercées par les autres mesures,
- ϵ_I , l'exactitude résultante des mesures I .

C'est σ_I qu'il s'agit d'évaluer afin de l'employer à pondérer les mesures I dans le calcul du bloc qui sera alors le plus précis.

Mais, le résidu moyen quadratique (rmqI) chiffre ϵ_I .

L'idée est de faire un calcul tel que β_I soit nul ; en ce cas, rmqI chiffre σ_I . Dans la pratique, β_I est presque nul, ce qui permet d'approcher σ_I .



6.4.5.2. Résultats

Des essais ont été menés, en ce sens, sur le bloc ADEF (8 segments, 32 scènes, 868 points et 2342 mesures et 558 points terrain tous en appui). La modélisation employée est celle qualifiée de 'normale' dans cette étude (V, A, F), sans P. Les

écarts moyens des paramètres de vitesse ne sont pas reportés ici, A et F pouvant être considérées comme inconnues principales.

Image	Poids				RMQ image		EMQ terrain			écarts Attitude			coeff F		
	Appui	Info A	Info F	A	F	x	y	X	Y	Z	Ax	Ay	Az	HRV1	HRV2
					en 10 ⁻⁶		en mètres			en microradians			en 10 ⁻³		
pondération de compensation						12	12	6	6	4	400	400	400	1	1
1	1	1	1		2,4	3,9	5,7	5,5	4,2	480	420	240	0,6	0,5	
0,1	0,1	1	1		2,7	4,1	6,8	5,6	6,3	472	330	207	0,3	0,6	
0,01	0,01	1	1		6,1	7,5	13,1	39,7	16,4	432	237	172	0,1	0,8	
1	0,1	0,1	0,1		2,3	3,9	6,1	5,7	4,6	478	423	243			
1	0,01	0,01	0,01		2,2	3,8	9,9	6,1	10,5	449	420	260			
0,1	1	0,1	0,1		5,6	6,3	0	0	0	479	415	245	vrai MC		
0,1	1	0,1	0,1		2,5	3,9	5,7	5,5	4,3	479	415	246			
0,01	1	0,01	0,01		5,7	6,4	0	0	0	479	415	245	vrai MC		
0,01	1	0,01	0,01		2,5	3,9	5,7	5,5	4,3	479	415	245			
pondération de compensation						4	4	6	6	4	400	400	400	1	1
1	1	1	1		2,3	3,9	5,9	5,6	4,2	478	424	440	0,6	0,4	
1	1	1	0,1		2,3	3,9	5,9	5,6	4,2	478	424	440	0,5	0,4	
1	-	1	1		2,3	3,9	-	-	-	195	360	264	0,4	0,3	
1	1	0,1	0,1		2,3	3,9	5,9	5,6	4,2	480	425	240			

lignes en grisé Valeurs des pondérations σ_{Ix} , σ_{Iy} , σ_X , σ_Y , σ_Z , σ_{Ax} , σ_{Ay} , σ_{Az} , σ_{F1} , σ_{F2}
 la colonne **Poids** donne les 4 facteurs multiplicatifs p_I , p_T , p_A , p_F , tels que les écarts-type servant à la pondération effective sont respectivement σ_{Ix}/p_I , σ_{Iy}/p_I , σ_X/p_T , σ_Y/p_T , σ_Z/p_T , σ_{Ax}/p_A , σ_{Ay}/p_A , σ_{Az}/p_A , σ_{F1}/p_F , σ_{F2}/p_F .
 le - signifie non prise en compte des équations d'appui ou $p_T = 0$
 Tous les chiffres sont les moyennes quadratiques des écarts entre valeurs observées et calculées des observations.
 La mention *vrai MC* signifie 'résidus terrain au sens des Moindres Carrés' et trouve son explication dans le 'NOTA : Résidus et écarts' de la page suivante.

Tab 6.12 : Evaluation de la précision des groupes de mesures

De ces calculs, la pondération à adopter pour ce bloc est donnée par les chiffres en gras dans le tableau.

écarts moyens des paramètres de vitesse ne sont pas reportés ici, A et F pouvant être considérées comme inconnues principales.

Poids				RMQ image		EMQ terrain			écarts Attitude			coeff F	
Image	Appui	Info A	Info F	x	y	X	Y	Z	Ax	Ay	Az	HRV1	HRV2
				en 10-6		en mètres			en microradians			en 10-3	
pondération de compensation				12	12	6	6	4	400	400	400	1	1
1	1	1	1	2,4	3,9	5,7	5,5	4,2	480	420	240	0,6	0,5
0,1	0,1	1	1	2,7	4,1	6,8	5,6	6,3	472	330	207	0,3	0,6
0,01	0,01	1	1	6,1	7,5	13,1	39,7	16,4	432	237	172	0,1	0,8
1	0,1	0,1	0,1	2,3	3,9	6,1	5,7	4,6	478	423	243		
1	0,01	0,01	0,01	2,2	3,8	9,9	6,1	10,5	449	420	260		
0,1	1	0,1	0,1	5,6	6,3	0	0	0	479	415	245	vrai MC	
0,1	1	0,1	0,1	2,5	3,9	5,7	5,5	4,3	479	415	246		
0,01	1	0,01	0,01	5,7	6,4	0	0	0	479	415	245	vrai MC	
0,01	1	0,01	0,01	2,5	3,9	5,7	5,5	4,3	479	415	245		
pondération de compensation				4	4	6	6	4	400	400	400	1	1
1	1	1	1	2,3	3,9	5,9	5,6	4,2	478	424	440	0,6	0,4
1	1	1	0,1	2,3	3,9	5,9	5,6	4,2	478	424	440	0,5	0,4
1	-	1	1	2,3	3,9	-	-	-	195	360	264	0,4	0,3
1	1	0,1	0,1	2,3	3,9	5,9	5,6	4,2	480	425	240		

lignes en grisé Valeurs des pondérations σ_{Ix} , σ_{Iy} , σ_X , σ_Y , σ_Z , σ_{Ax} , σ_{Ay} , σ_{Az} , σ_{F1} , σ_{F2}
la colonne **Poids** donne les 4 facteurs multiplicatifs p_I , p_T , p_A , p_F , tels que la pondération effective est σ_{Ix}/p_I , σ_{Iy}/p_I , σ_X/p_T , σ_Y/p_T , σ_Z/p_T , σ_{Ax}/p_A , σ_{Ay}/p_A , σ_{Az}/p_A , σ_{F1}/p_F , σ_{F2}/p_F .
le - signifie non prise en compte des équations d'appui ou $p_T = 0$
Tous les chiffres sont les moyennes quadratiques des écarts entre valeurs observées et calculées des observations.
La mention *vrai MC* signifie 'résidus terrain au sens des Moindres Carrés' et trouve son explication dans le 'NOTA : Résidus et écarts' de la page suivante.

Tab 6.12 : Evaluation de la précision des groupes de mesures

De ces calculs, la pondération à adopter pour ce bloc est donnée par les chiffres en gras dans le tableau.

6.4.5.3. En conclusion

De là, les chiffres adoptés de façon standard (bien qu'éventuellement provisoire), déduits en arrondissant ces valeurs qui rejoignent les chiffres proposés a priori, et devant être confirmés sur de plus nombreux blocs bien équipés, sont les suivants :

- 12. 10^{-6} pour mesures sur les images en mode panchromatique (24. en XS).
- 6 m pour les relations de planimétrie en X et en Y.
- 4 m pour les relations d'altimétrie en Z (pour B/H >.8)
- 400 μ rd pour l'information sur l'attitude (incluant la position)
- .5 10^{-3} pour l'information sur le coefficient F

auxquels il faut rajouter,

- 1.1m/s pour l'information sur la dérive en vitesse V.
- 400 μ rd pour l'information sur le biais inter HRV, noté R.

NOTA : Résidus et écarts

Les écarts terrain (appui) ne correspondent pas aux résidus des observations d'appui au sens des moindres carrés. En effet, les coordonnées compensées de points terrain ne correspondent pas aux résultats de la compensation globale au sens des moindres carrés.

Les coordonnées compensées d'un point d'appui sont les coordonnées compensées d'un point (pas d'appui) superposé à ce point d'appui, c'est à dire qui aurait été mesuré à la même place, sur les mêmes images. Ceci est dû au fait que lors du recalcul des points d'appui, les relations terrain ne sont pas réintroduites, seules les mesures sur les images sont utilisées. Le point d'appui est à l'intersection des rayons de visée des images sur lesquelles il a été mesuré.

Ceci donne donc des écarts aux points d'appui moins favorables, mais qui permettent de détecter mieux les erreurs sur ces points ("en plaquant moins le bloc sur le réseau d'appui").

En revanche, les résidus clichés aux points d'appui, moins contraints, sont légèrement favorisés.

6.4.5.4. Quelques remarques

On peut s'étonner qu'une valeur équivalente à 1 pixel ait été retenue pour pondérer les mesures, alors que les résultats annoncent une exactitude de 1/3 pixel. En comparant les EMQ terrain des deux calculs avec Poids (1 1 1 1), l'un avec 1 pixel l'autre avec 1/3, le premier donne des résultats légèrement meilleurs sur le terrain. Il est exact que l'EMQ sur les observations ne permet pas d'estimer directement la précision ; mais cela n'explique pas tout. En revanche, une autre explication existe : le fait d'alléger la contrainte photogrammétrique, relâche le modèle photogrammétrique et permet d'absorber de petites imperfections du modèle par rapport à la réalité de la prise de vues. C'est un phénomène observé en aérotriangulation.

Les pondérations présentées ont été introduites dans tous les calculs effectués au cours de cette étude, sur les 4 jeux de données différents. Le critère principal de validation était l'exactitude terrain (EMQ aux points de contrôle). Les résultats obtenus avec ce jeu de pondérations ont confirmé les attentes, et n'ont pas remis en cause ces valeurs.

7. Vérification expérimentale du modèle

Les calculs expérimentaux ont un double but. Le premier but est de chiffrer l'exactitude et la précision de triangulation d'un bloc d'images Spot. Le second est de confirmer le choix de la modélisation (6.3).

Après quelques remarques sur les données, et la présentation des résultats chiffrés, on examinera la qualité géométrique d'un bloc et les facteurs qui l'influencent.

7.1. Données

7.1.1. Blocs de tests

7.1.1.1. Origine des blocs

Les données d'expérimentation sont issues de 5 blocs d'images Spot. Tous sont stéréoscopiques. Ces jeux de données ont été utilisés à tel ou tel stade de l'étude pour faire les contrôles requis. L'intérêt de certains d'entre eux ne réside que dans leur existence à un moment donné.

Aucun d'entre eux ne rassemble toutes les qualités requises pour un jeu de tests parfait. Des imprécisions dues au processus de mesure ont été décelées. L'obligation de passer par des films pour effectuer des observations stéréoscopiques sur ces données, numériques à l'origine, ajoute aux perturbations.

Pour chacun de ces blocs sont précisées, dans les annexes 1 à 6 les références des scènes, l'origine des points terrain d'appui et de contrôle, l'origine des mesures et les résultats des différents calculs.

7.1.1.2. Structure des blocs

Les calculs avec tous les points en appui ont permis de 'faire le ménage' des blocs, c'est-à-dire d'inactiver les observations probablement erronées. Le critère retenu pour cette inactivation manuelle, est un résidu de compensation supérieur à trois fois la moyenne quadratique. Les graphiques situés en annexe, montrant les points d'appui, les montrent avec leur activité réelle après épuration. Il est possible, pour un point, d'inactiver une deux ou trois relations terrain. Sur les graphiques, les résidus des relations inactives sont en pointillés.

C'est le calcul tous points en appui du bloc avec cette structure 'propre' qui servira de référence par la suite. Cette même structure est conservée lors du changement de statut (Appui/Contrôle) de certains points.

7.1.2. Calculs

Tous les calculs ont été effectués sur la chaîne de Triangulation Spatiale Spot développée sur Vax à cet effet. L'évolution de celle-ci a suivi les développements de cette étude. Pour chaque test la version du modèle utilisée sera précisée.

Les principales versions employées sont les suivantes :

- α -> Ax Ay Az, Px Py Pz, Vx Vy Vz (+ Rx Ry Rz)
- β -> Ax Az, Px Pz, Vx Vz (+ Rx Ry Rz)
- γ -> Ax Ay Az, Pz, F, Vz (+ F2 Rx Ry Rz)
- m 0 -> Ax Ay Az, F, Px Py Pz, Vx Vy Vz (+ F2 Rx Ry Rz)
- m 1 -> Ax Ay Az, F (+ F2 Rx Ry Rz).
- m 2 -> Ax Ay Az, F, Vx Vy Vz (+ F2 Rx Ry Rz) , préconisée in fine.

L'utilisation d'une ou plusieurs des inconnues de vitesse (dans les versions α et β) est due à un défaut du logiciel, non prévu pour pondérer totalement indépendamment Px, Py, Pz, Vx, Vy, Vz.

Comme précisé au chapitre précédent, le changement de modélisation n'affecte, pour ainsi dire pas les coordonnées terrain des points, excepté pour les équipements très légers. Ces changements ne modifient pas les conclusions en matière d'exactitude de triangulation de points inconnus, sauf dans les cas extrêmes.

7.1.3. Chiffres

En prenant comme référence les coordonnées terrain des points (notées X_T , Y_T , Z_T), trois types de chiffres seront analysés :

- **EMQ aux points d'appui**, moyenne quadratique des écarts, étudiés lorsque tous les points terrain sont en appui, et définis comme suit,

$$EMQ_X = \sqrt{\frac{1}{n_{XY}} \cdot \sum_{\text{points XY}} (X_T - X_{\text{calc}})^2} \quad EMQ_Y = \sqrt{\frac{1}{n_{XY}} \cdot \sum_{\text{points XY}} (Y_T - Y_{\text{calc}})^2}$$

$$EMQ_Z = \sqrt{\frac{1}{n_Z} \cdot \sum_{\text{points Z}} (Z_T - Z_{\text{calc}})^2} \quad EMQ_{XY} = \sqrt{EMQ_X^2 + EMQ_Y^2}$$

- **EMQ aux points de contrôle**, étudiés lorsqu'il existe des points de contrôle, et définis de façon analogue.

- **ECT des points de contrôle**, moyenne quadratique des écarts à la moyenne, estimateur de l'écart-type des écarts, utilisés essentiellement pour les calculs sans appui.

si $m_x = \frac{1}{n_{c_{XY}}} \cdot \sum_{ctrl\ XY} X_T - X_{calc}$, m_Y et m_Z définis de même.

$$\text{alors } ECT_x = \sqrt{\frac{1}{n_{c_{XY}}} \cdot \sum_{ctrl\ XY} (X_T - X_{calc} - m_x)^2}$$

L'EMQ aux points de contrôle chiffre l'**exactitude terrain**, l'ECT chiffre la **précision**.

Au lieu de comparer la position calculée du point à sa position 'connue', en particulier pour évaluer les dégradations dues à l'allègement du canevas d'appui d'un bloc, on peut comparer position calculée, dans une compensation avec une configuration d'appui allégée, et position calculée dans un calcul de référence (i.e. position du même point calculée lors d'une compensation servant ensuite de référence, par exemple, avec tous les points en appui).

Ceci permet d'évaluer une compensation (à condition d'avoir une référence) sur tous les points observés et non sur les seuls points terrain.

On chiffrera la moyenne quadratique de ces écarts, **EMQ_REF**, défini comme

$$\text{suit : } EMQ_REF_x = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{points} (X_{calc} - X_{calc_REF})^2}$$

Pour tous les calculs présentés en annexe, sont fournis, pour les points d'appui et pour les points de contrôle, pour chacune des trois coordonnées X, Y, Z, l'écart moyen, l'écart maximum et minimum, l'écart moyen quadratique EMQ et l'ECT; ainsi que le nombre de relations d'appui et de contrôle, de planimétrie et d'altimétrie.

L'unité utilisée est le mètre.

NOTA : Points de contrôle

Tout point de contrôle est utilisé comme point de liaison. Il agit donc dans la compensation par ses relations image pour la détermination des paramètres des segments. Seules ses coordonnées terrain (externe) ne sont pas utilisées, sinon pour chiffrer la différence entre celles-ci et les coordonnées compensées. Ce choix a été fait car, en tout état de cause, générer des points de liaison est toujours possible à moindre coût.

7.2. Calcul de blocs

Pour commencer, les blocs ont été calculés avec tous les points-terrain en appui. Les écarts moyens quadratiques en mètres sont les suivants :

bloc	ADEF	DJIBOUTI	KETIR
nombre de scènes	32	31	12
nombre de segments	8	10 dont 5 bisegments	3 dont 1 bisegment
nombre de points XY	493	30	82
EMQ XY en m	7,9	8,5	6,2
nombre de points XY	514	190	107
EMQ Z en m	4,2	5,0	6,4

Ces valeurs comprises entre 6 et 9 m en planimétrie et 4 et 6 m en altimétrie, sont analogues aux valeurs obtenues en ne traitant qu'un couple de scènes (cf RODRIGUEZ 88).

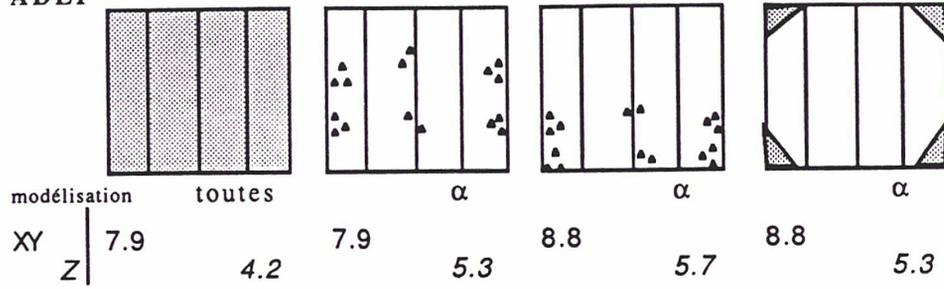
Aucun systématisme des écarts terrains n'est noté en examinant les graphiques A1.6 et A5.3. Le modèle adopté modéliserait donc correctement la prise de vues Spot.

Bien évidemment, ce qui nous intéresse, pour un calcul de spatiotriangulation, ce sont les résultats avec peu de points d'appui.

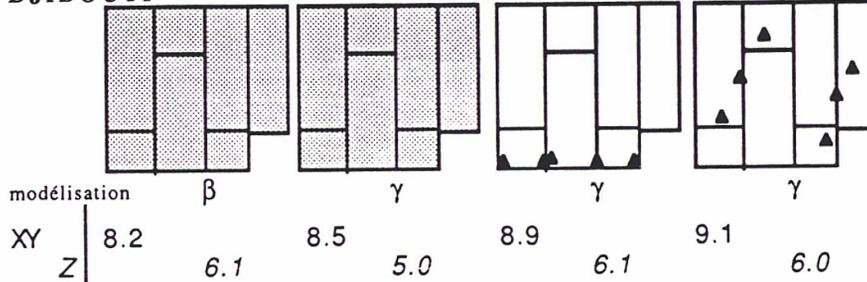
De très nombreux calculs ont été effectués, avec différentes modélisations, et différentes configuration d'appui. Seule une sélection d'entre eux sont ici exposés : en indiquant par un schéma la stucture du bloc et en fournissant l'EMQ aux points de contrôle, et lorsque tous les points sont en appui, l'EMQ aux points d'appui.

Les écarts moyens quadratiques en mètres sont les suivants :

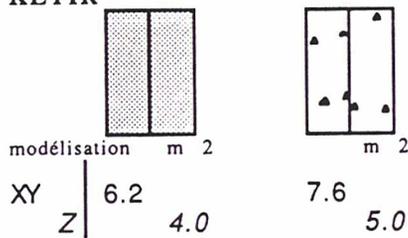
ADEF



DJIBOUTI



KETIR



Ces valeurs sont toujours comprises entre 6 et 9 m en XY et 4 et 6 m en Z. Elles chiffrent l'exactitude du calcul, ou encore la précision de triangulation du bloc calculé.

La modélisation utilisée influe peu sur le résultat. Quant à l'incidence de la configuration d'appui, elle sera analysée ci-dessous (7.4)

Ces chiffres permettent d'annoncer une précision, et même une exactitude, de moins de 9 mètres en planimétrie et de moins de 6 mètres en altimétrie.

L'objectif d'assurer la même précision sur un bloc que sur un couple, à savoir moins de 10 m en planimétrie et de 6 m en altimétrie est atteint. Reste à évaluer plus finement les facteurs dont dépendent ces valeurs.

7.3. Influence des facteurs externes

7.3.1. Influence du rapport B/H

La précision altimétrique est directement liée au B/H (cf 5.4).

L'analyse présentée dans l'annexe 2, était destinée essentiellement à confirmer sur un couple de segments, les résultats prévisibles et déjà confirmés sur des couples, en particulier l'influence du B/H.

Les données constituent un triplet stéréoscopique formé de trois segments d'incidences différentes sur une même bande de 4 scènes de long. Ce triplet (noté réf.) est le premier bloc que nous ayons compensé.

Ecarts au terrain aux points d'appui

B/H	1.0	0.6	0.3	réf.
XY	7.2	8.4	9.2	7.6
Z	3.7	5.3	7.1	4.5
nbre pts	101	100	87	119

Ecarts moyens quadratiques en mètres

Les constatations effectuées pour des couples de scènes se retrouvent sur des couples de segments, conformément à la théorie. Le B/H dégrade peu la planimétrie (de 7 à 9 m) et a des incidences sur l'altimétrie (de 4 à 7 m).

Tous les autres blocs de tests exploités sont formés de couples de B/H supérieur à 0.8, afin de garantir une bonne précision altimétrique.

7.3.2. Prise en compte du géoïde

La connaissance du géoïde a été introduite, pour affiner la transformation \mathcal{F} de coordonnées des points (cf 4.3.5), sur les données de tests situées en France.

Nous n'avons pas pu vérifier expérimentalement l'apport de cette prise en compte. Pour le montrer, il faut sur une zone où le géoïde diffère de l'ellipsoïde, donc relativement étendue effectuer un calcul en utilisant peu d'appuis. C'est donc difficile à réaliser tant que le calcul d'un bloc très peu appuyé n'est pas maîtrisé parfaitement.

L'idée était de comparer la hauteur en un point du géoïde sur l'ellipsoïde, et l'écart entre l'altitude connue (hauteur sur géoïde du point) et le Z calculé sans prendre en compte la connaissance du modèle de géoïde.

7.3.3. Qualité des points terrain

Aucune étude fine n'a été conduite ici pour vérifier comment la précision de triangulation dépend de la qualité des points d'appui. Le jeu de données ADEF est équipé, bien involontairement, de points de précisions diverses (et mal déterminées). Neto (cf OEEPE 91) a tenté une telle analyse, sur le jeu de données OEEPE, avec peu de conclusions. Comme les points des diverses catégories ne sont pas répartis sur l'ensemble du bloc (cf A1.4), on ne peut dissocier les effets de la localisation des appuis, des effets dus à leur précision.

Nous avons simplement constaté, sur tous nos blocs, qu'il n'y avait pas de désaccord entre les EMQ des calculs de bloc (les mieux appuyés possible) et ce que nous estimions en matière de précision des points d'appui.

Cherchant à obtenir la meilleure précision possible, Toutin (cf TOUTIN 90) a réalisé des essais sur un triplet de scènes situées au Canada, équipé de 125 points, déterminés à 2m, avec 6 points en appui. Il annonce des résultats de 3m par coordonnée pour le triplet, et de 4m pour le couple. Il souligne l'importance de la qualité des mesures et de la modélisation pour atteindre ce résultat.

Il note aussi que si les points d'appui sont de qualité médiocre, la multiplication de ceux-ci permet de garder cependant une bonne exactitude.

Ceci ne me semble valable que si les erreurs sur les points suivent une loi centrée, ce qui semble être le modèle d'erreur qu'il a adopté pour ces simulations. En revanche, si les erreurs ne sont pas centrées, ce qui est le cas du bloc Iran (Annexe 6), où les points sont extraits de deux séries de cartes différentes et non cohérentes entre elles, le bloc n'a probablement pas une bonne exactitude, malgré une précision correcte. Aucun moyen de vérification n'était disponible pour le confirmer.

7.4. Configuration d'appui

La question posée est ici la suivante : Quelle est la configuration d'appui, minimale (en nombre de points), optimale (car garantissant la même précision qu'avec un équipement dense) ?

Une réponse est apportée pour un couple de segments, des essais d'équipement allégés ont été conduits sur les blocs.

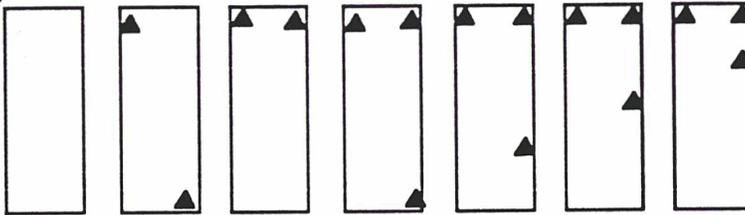
7.4.1. Equipement d'un couple de segments

Ce point a été étudié sur les deux couples de segments du bloc OEEPE (cf Annexe 3). Ces essais ont menés à ces deux conclusions :

1. Deux points ne suffisent pas pour garantir l'exactitude attendue.
2. Trois points, si les deux premiers sont sur les deux bords du couple, et le troisième à plus d'une scène des deux premiers, suffisent à équiper un couple de segments.

Les résultats principaux en sont :

OEEPE



EMQ

XY	6.6	13.1	12.9	7.7	8.6	12.7	19.3
Z	3.6	4.1	5.2	4.7	5.3	5.4	5.6

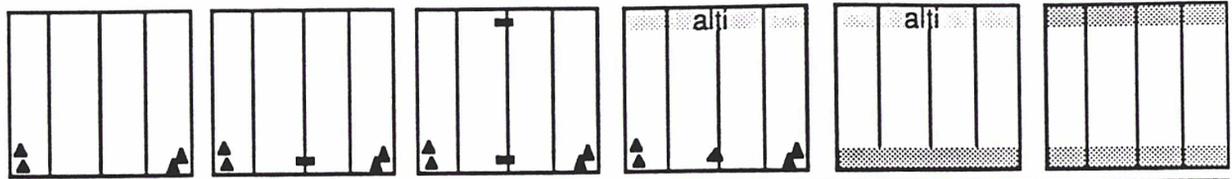
Ceci permet déjà quelques extrapolations. En effet, avec 3 points, la surface traitée est au moins double de celle délimitée par les appuis.

Par ailleurs, contrairement aux bandes de clichés aériens, il n'est pas nécessaire de disposer de plus de points altimétriques que de points planimétrique. Le couple de segments est stable en altimétrie.

7.4.2. Essais d'équipements allégés d'un bloc

Les résultats ci-dessus laisse prévoir que trois points par couple de segments, est un maximum. Au delà, comment étendre au bloc les résultats obtenus sur un couple ? Comme a priori, ce n'est pas dans le sens longitudinal (Nord-Sud) que sont les difficultés, mais dans le sens transversal (Est-Ouest). C'est dans cette voie que sont orientées les trois séries d'essais qui suivent.

ADEF modélisation m0

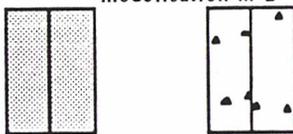


EMQ										
XY	10.0		9.7		9.7		10.9		11.8	9.2
Z		18.6		9.2		7.7		7.4		5.3
ECT										
XY	9,1		9,1		9,1		9,4		10,2	9,1
Z		11,5		9,0		7,4		7,0		5,2

Avec quelques points au Sud, dès qu'il y a au moins un point au Nord, la précision du bloc est atteinte, mais son exactitude ne conviendra qu'avec des points répartis au Nord et au sud du bloc.

Les écarts maximaux sont alors de 20 m sur chaque coordonnées. Ce chiffre peut être accepté.

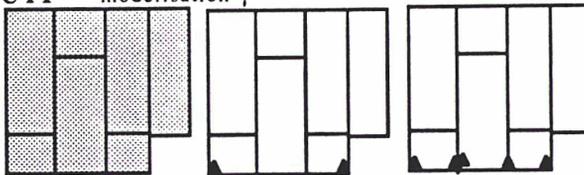
KETIR modélisation m 2



EMQ				
XY	6.2		7.6	
Z		4.0		5.0

Les écarts en chaque point entre ces deux calculs sont représentés sur le graphique A4.2. La différence entre les deux calculs est inférieure à 10 m. On peut remarquer des écarts altimétriques sur la partie commune aux deux bandes, signe de problèmes de liaison latérale.

DJIBOUTI modélisation γ



EMQ							
X	Y	6.2	5.8	10.3	6.1	6.7	5.8
Z			5.0		6.1		6.1
ECT							
X	Y		8,1	5,8	6,7	5,8	
Z				6,1		6,1	

Ces chiffres montrent que les écarts maximaux aux points terrain, (non répartis sur l'ensemble des scènes), sont inférieurs à 20 m en X et Z et à 15 m en Y, contre

14 m en X, Y, et Z pour le bloc de référence. De plus, la moyenne des écarts sur le bloc à 2 appuis est de -6.4 m en X ; c'est un signe.

Seule la précision en X, est dégradée entre le calcul à 2 points E-W et le calcul à 5 points. Ce calcul montre qu'on ne peut se contenter dans le sens E-W, de deux points aux deux coins extrêmes, et qu'il faut prévoir un point sur le bord Est et le bord Ouest de chaque segment.

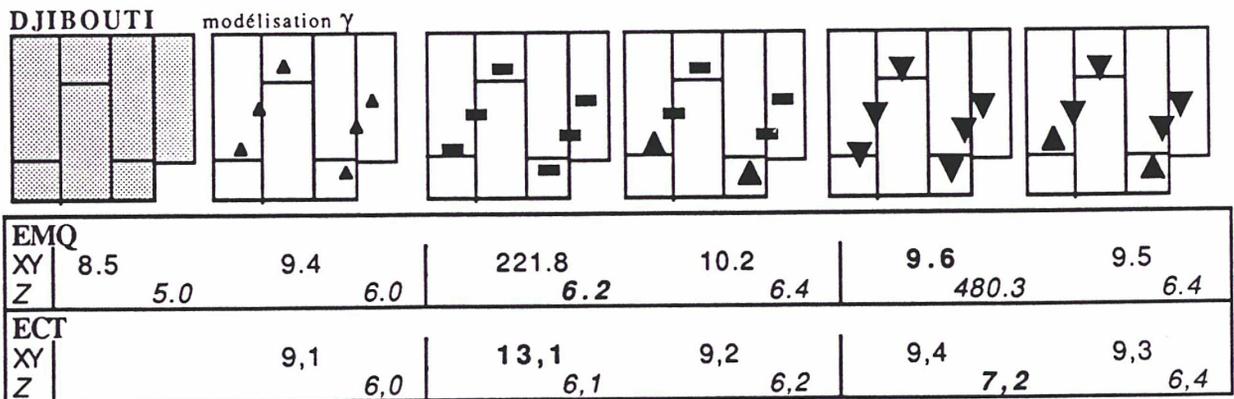
Sur un tel bloc, un 'troisième point' au Nord permettrait d'atteindre l'exactitude du bloc de référence.

Pour évaluer la déformation du bloc, ces deux calculs ont été comparés au calcul de référence. Ces comparaisons sont présentées sous forme de graphiques : A5.5 et A5.6. Ces graphiques montrent que l'écart maximal entre le bloc à 5 appuis et le bloc de référence est de 10 mètres (sans tenir compte de la bande Est), tandis que celui-ci atteint 20 m si le bloc n'a que deux appuis.

Ceci confirme ce qui précède : il faut prévoir des points aux deux coins et à chaque interbande.

7.4.3. Répartition alti / plani

Afin d'évaluer l'influence des appuis altimétriques sur la précision planimétrique, et vice-versa, ont été étudiées les configurations ci-après :



D'après ces chiffres, avec uniquement des appuis altimétriques, seule la précision planimétrique est dégradée, le bloc ne bouge pas en altimétrie. De façon analogue, avec uniquement des appuis planimétriques, seule la précision altimétrique est dégradée, le bloc ne bouge pas en planimétrie.

Les relations d'appui altimétriques n'influent pas sur la précision planimétrique, les relations d'appui planimétriques n'ont pas d'effet sur la précision altimétrique.

Enfin, deux points XYZ et quatre points soit XY, soit Z, suffisent à appuyer ce bloc. Même avec des appuis altimétriques réduits à deux points, ce bloc peut assurer la précision attendue. Ceci souligne la grande stabilité altimétrique des blocs Spot.

7.5. Calcul de bloc sans points d'appui

7.5.1. Intérêt

Le calcul sans appui a un intérêt pour l'élimination des fautes grossières de mesures, avant même l'introduction de données d'appui, surtout quand elles sont médiocres.

C'est ce qui a été utilisé sur l'Iran pour éliminer fautes grossières, de numérotation et d'identification de points de liaison, sur un calcul réel (sans les contrôles pléthoriques des jeux d'essai) avec de mauvais points d'appui (à 100m).

Au delà, l'idée directrice est ici qu'avec des points d'appui, la précision ne sera pas moindre que sans appui, sauf bien sûr en donnant un poids beaucoup trop fort à des relations d'appui très mauvaises.

De plus, la connaissance de la précision dans le cas de calculs sans points d'appui, c'est-à-dire la précision 'relative' du système, n'est pas sans intérêt. Certaines applications ne nécessitent qu'une localisation relative d'un objet éloigné.

7.5.2. Précision

On chiffre la précision par l'écart ECT aux points de contrôle. Voici quelques extraits du tableau (A8.1), donnant les ECT_x, ECT_y, ECT_z pour des modélisations différentes des deux mêmes blocs:

ECT _x ECT _y ECT _z				ECT _x ECT _y ECT _z		
ADEF				DJIBOUTI		
9,4	7,5	15,2	m 0	11,0	7,1	7,0
7,5	7,8	14,1	m 2	11,1	6,1	8,1
8,9	6,3	20,8	m 1			
8,6	6,2	14,5	γ	12,2	6,0	22,6
9,5	5,2	26,2	β			
9,8	7,6	23,6	α	10,9	7,1	7,1

La précision dépend beaucoup de la modélisation employée. D'après ces essais, le système permet d'atteindre une précision de 15 m en planimétrie et en altimétrie.

Pour ne pas en rester à ces moyennes quadratiques, nous allons évaluer quelle est la déformation du bloc.

7.5.3. Déformation du bloc sans appui

Comme, a priori, un bloc sans appui est défini à une translation-rotation près, ceci conduit à analyser les résidus après cette transformation, pour évaluer le degré de déformation du bloc sans appui par rapport au bloc bien équipé.

La méthode pour l'évaluer est de déterminer, par moindres carrés, la translation-rotation appliquant au mieux le bloc RIEN, i.e. 'Aucun appui', au bloc TOUT, i.e. 'Tous appuis', pris comme référence.

$$M_{RIEN} = T + R M_{TOUT}$$

L'analyse portera ensuite sur la valeur des angles de la rotation R, et l'ampleur des résidus de la transformation.

Estimation de la translation rotation bloc RIEN -> bloc TOUT							
R : angles de rotation en microradians		Rx	Ry	Rz	Tx	Ty	Tz
T : translation en mètres <i>rmq en mètres</i>		<i>rmqX</i>	<i>rmqY</i>	<i>rmqZ</i>			
B	Vx Vy Vz Ax Ay Az F	-109	-51	58	58,3	-358,2	464,1
		4,0	2,2	11,7			
C	Pz Vz Ax Ay Az	-169,0	-295,0	67,0	95,3	-365,5	456,1
		4,2	2,0	5,4			
D	Px Py Pz Az F	-125	-108	62	66,0	-371,7	440,5
		3,6	2,1	11,6			

bloc ADEF

Tab 7.1 : Comparaison du bloc sans appui au bloc de référence

7.5.3.1. Influence de la modélisation utilisée

Ce tableau montre premièrement l'importance de la modélisation lorsqu'il n'y a plus d'appui. Notre modélisation(B), est celle qui fait "tourner" le moins le bloc, bien que les résidus soient forts. La modélisation (D), plus rigide car sans inconnues de vitesse, garde des inconnues corrélées F et Pz, et n'apporte rien. La modélisation (C), sans inconnues corrélées, avec une inconnue (égarée ?) de vitesse est celle qui déforme le moins le bloc, car les résidus d'ajustements y sont faibles, mais qui le fait tourner le plus.

7.5.3.2. Valeur de la rotation

La rotation du bloc 'aucun appui' par rapport au bloc de référence 'tous appuis' est de 300 microradians, et même 100 microradians pour notre modélisation. Ces valeurs d'angles de quelques 10^{-4} radians semblent convenir à la précision relative demandée pour les applications de ce type (milliradian).

On peut se demander pourquoi garder pour tous les segments tous leurs paramètres en ce cas. En effet, on pourrait bloquer les inconnues d'un segment, et déterminer les autres segments relativement à celui-là. En fait si le nombre de segments est élevé n ou $n-1$ sont peu différents. Grâce aux équations d'information, le bloc se calcule extrêmement bien en gardant toutes les inconnues. c'est pourquoi nous les avons toutes conservées.

7.6. Autres facteurs importants

7.6.1. Qualité des points et des pointés

En marge des tests de vérification du modèle, les calculs effectués ont permis de faire les remarques suivantes sur la qualité des pointés.

Les tests OEEPE (cf Annexe 3) montrent une dispersion des résultats lorsque les pointés sont faits par chacun, bien plus importante que lorsqu'un même jeu de mesures est exploité par tous.

Autre conclusion de ces mêmes tests, les pointés en pseudo-stéréo (monoscopie simultanée) même sur image numérique, sont moins bons que des pointés en stéréo sur films, lorsque les points ont été choisis et définis en stéréoscopie.

Les mesures stéréoscopiques sur images numériques permettront d'éviter ce genre de difficulté. Ceci sera possible sur appareil dit 'tout numérique', comme le T10, actuellement en développement. Les mesures effectuées n'ont pu être exploitées. En effet, aussi surprenant que cela paraisse, cet appareil ne fournit pas aujourd'hui en sortie de mesures en ligne-colonne. Il s'agirait probablement d'équivalent-microns-cliché.

La qualité des pointés est certes due au mode opératoire, mais pas entièrement. Elle est difficilement dissociable de la qualité des points. Car le pointé associe

l'identification à la mesure, et le choix du point associe l'identification à la détermination.

En effet, lors de la collecte des points-terrain, ces points sont recherchés non seulement bien identifiables, mais encore bien déterminables (sur une carte existante ou sur le terrain). Ces deux éléments doivent être conciliés.

Un autre facteur important, qui diffère de la photogrammétrie aérienne, c'est la date de prise de vues, ou plutôt les écarts de date d'acquisition entre scènes à observer en stéréoscopie. Ceci a rendu délicates certaines liaisons du bloc ADEF.

L'acquisition par un système de stéréoscopie Avant-Arrière supprimerait ce problème à l'intérieur d'un couple de segments, mais ne le supprimera pas pour les mesures de points interbandes, d'autant que la partie interbandes risque d'y être très étroite.

7.6.2. Qualité des liaisons

On peut toujours compenser ensemble des données non liées, mais cela n'a aucun intérêt. Qui dit compensation globale suppose des liens. Ces liens sont matérialisés ici par des points de liaison entre segments adjacents.

Tout ce qui précède, et notamment les essais sans appui, montre l'importance des liaisons latérales. Celles qui lient les coefficients F de segments adjacents. Ce point serait moins crucial si les F étaient connus.

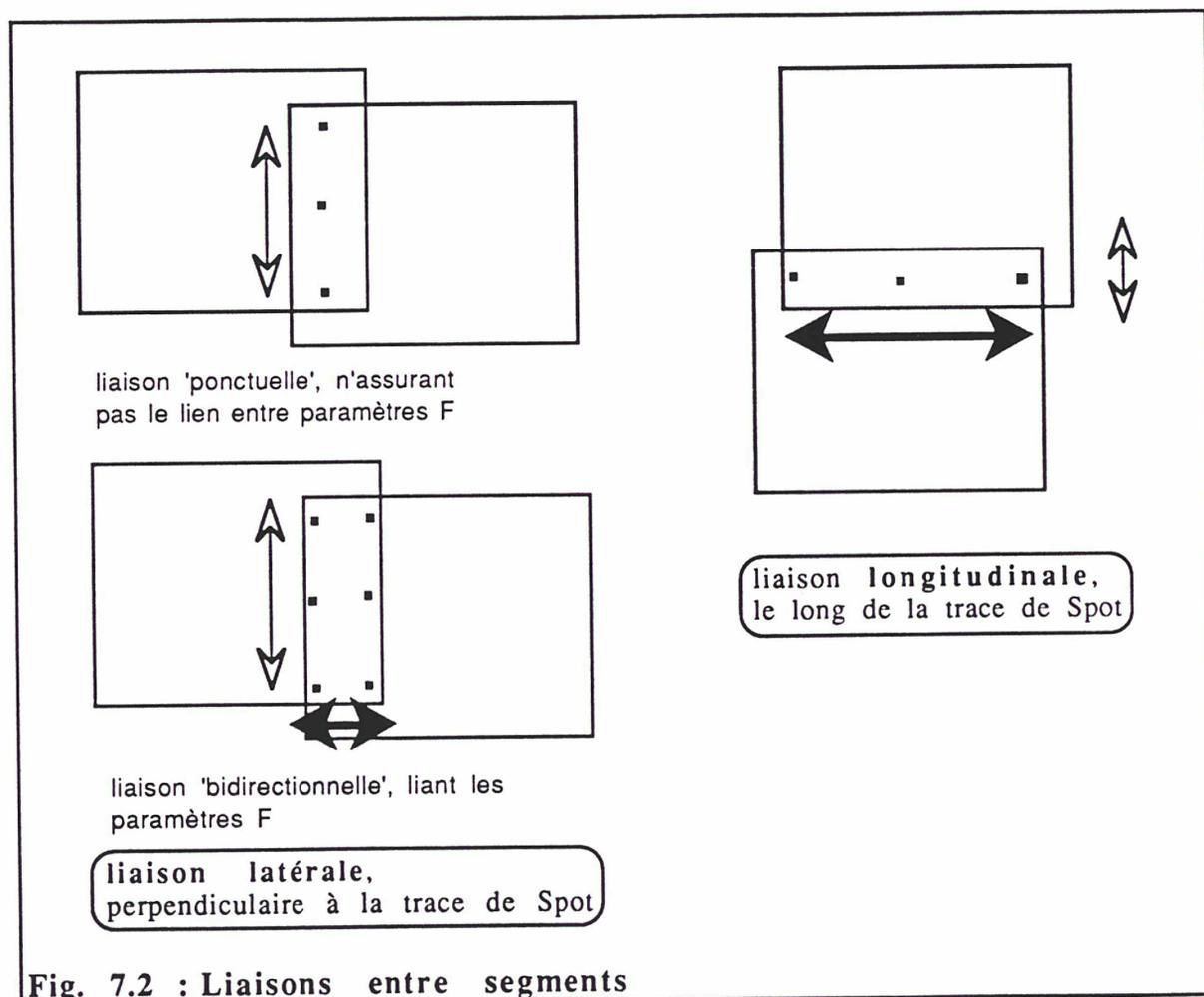
La qualité des points de liaison, c'est de remplir leur fonction d'assurer les liens entre paramètres des segments adjacents. On ne peut préparer des points de liaison sans savoir quels paramètres devront être liés. Il peut arriver que les données, à cause de leur faible recouvrement, ne permettent pas d'assurer pleinement ces liaisons ; en ce cas, la liaison sera assurée, si c'est possible par des points connus. Ainsi, le bloc de Djibouti a été préparé avant que ce problème des liaisons en géométrie Spot ne soit entièrement clarifié. Les points préparés ne permettent pas de bien lier les coefficients F des segments adjacents.

Les liaisons ne doivent pas être négligées. C'est le point faible de tout bloc et des blocs Spot en particulier, du fait de la géométrie de la prise de vues. En aérotriangulation, la liaison entre clichés d'une bande est assurée sans grand effort ; la liaison entre bandes, nécessite quelque attention, mais est en général homogène sur un bloc car les bandes sont parallèles (en tous cas les plans de vol

s'y emploient). En spatiotriangulation, la liaison latérale entre couples de segments stéréoscopiques, ne peut se contenter des points vus sur les 4 segments. Elle doit comprendre des points vus sur 3 segments. La manipulation des images pour effectuer les mesures de points de liaison n'est pas aisée.

Une observation minutieuse des tableaux d'assemblage des blocs de test (A1.1, A4.1, A5.1) résume ces considérations.

La **liaison longitudinale** est assurée sans difficulté aucune, dès que des points communs sont mesurés sur les bords Est et Ouest.



En revanche, pour la liaison latérale, la liaison des paramètres f n'est assurée que si la surface inscrite dans le polygone défini par les points de liaison a une certaine largeur.

Il n'est pas toujours facile de définir un point de liaison. C'est un point bien défini sur toutes les images où il est vu, ou bien, en tout cas, bien pointable dans tous les couples où il est observable. Ceci dépend directement de la qualité des

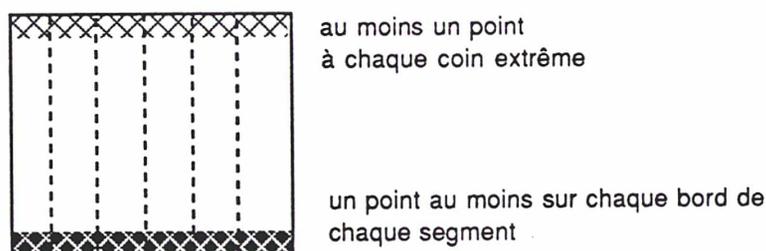
images dans les zones communes. Cette remarque n'est aucunement liée aux images Spot, car il en est exactement de même avec clichés aériens.

7.7. Equipement minimum d'un bloc

La configuration optimale d'appui d'un bloc dépend avant tout de sa forme et des segments qui le constituent.

Par ailleurs, parce qu'une erreur est inévitable, et qu'une faute peut toujours survenir, la pratique ne se contentera pas de points isolés, mais de séries de 2 ou 3 points proches. Il est ainsi délicat de raisonner en nombre de points minimum pour équiper un bloc. Oui, trois points suffisent à un segment, mais trois bons points. Et il en faut plus pour savoir que ceux-là sont bons. C'est bien ce que nous avons fait, en faisant un calcul avec tous les points en appuis pour déceler erreurs et fautes, et pour ne choisir ensuite que trois points cohérents avec les autres.

Ceci étant, avec les résultats des tests, le type de configuration minimum envisageable est le suivant :



C'est à dire en assurant une bonne liaison latérale par le sol (par des points connus), d'où la zone 'un point au moins sur chaque bord de chaque segment', et en ajoutant quelques points à l'autre extrémité, d'où la partie 'au moins un point à chaque coin extrême'.

En fait, si on compare nos résultats en matière d'équipement de bloc et par rapport à l'équipement de segments isolés, il n'y a pas de gain réel de nombre d'appuis 'en X', mais 'en Y', sans nul doute. En effet, transversalement, il en faut toujours un sur chaque bord du segment, ce qui permet cependant, en prenant des points communs, de passer de $2N$ à $N+1$, si N est le nombre de bandes. En revanche, pour tenir le bloc dans le sens Nord-Sud, il n'est pas probablement pas nécessaire de disposer d'un point par bande, $N+1$ est un maximum.

Le chiffre de $2N$ ($= N+1 + N-1$) points appuyer N bandes stéréoscopiques, soit $2N$ segments, peut être avancé. Ceci permet de dire qu'un point en moyenne par segment suffit.

A condition que les liaisons entre paramètres F soient assurées par le bloc, (ou que F , et P soient connus), des points d'appui aux quatre coins pourraient suffire.

8. Autres modélisations

D'autres modélisations ont été développées simultanément à cette étude par différents centres. Nous les présentons ici. Ces travaux, sauf mention explicite, et en ce cas uniquement pour diriger ou confirmer des hypothèses émises, n'ont pas été utilisés dans cette étude.

Cependant, la comparaison des résultats de compensation issus de ces diverses modélisations nous a permis de confirmer notre modèle. C'est pour cette raison que le sujet est évoqué dans ce dernier chapitre.

L'effort de développement de programmes de triangulation d'images Spot montre en outre l'intérêt des uns et des autres pour l'exploitation photogrammétrique des images Spot.

8.1. Une grande diversité des approches

Les approches sont très différentes tant en termes d'objectif poursuivi que de fonctionnalités recherchées. Elles varient suivant qu'elles émanent de géodésiens attachés à la modélisation précise du mouvement du satellite en orbite, ou de constructeurs d'appareils de restitution, cherchant à se rapprocher du modèle aérien en perspective conique. Certains ont cherché à développer un modèle démontrant les possibilités du système, d'autres ont cherché à développer un modèle exploitable pour la restitution.

Ces approches diffèrent, en premier, par la modélisation retenue pour modéliser le déplacement du satellite dans l'espace, en second, par l'emploi ou non des données auxiliaires, en troisièmepar la modélisation de l'attitude, et finalement, par le nombre de paramètres à déterminer.

On peut distinguer quatre types d'approche pour le déplacement du satellite. Il est modélisé soit par une droite, soit par une portion de cercle ou d'ellipse, soit par une portion d'orbite képlérienne prenant en compte les perturbations du champ de pesanteur, soit enfin, comme cela a été fait dans cette étude, par des écarts linéaires en temps, à la trajectoire donnée qui prend elle-même en compte ces perturbations. C'est ce critère qui est adopté pour la présentation un peu plus détaillée qui va suivre (8.2).

Quant aux données auxiliaires, certains les exploitent uniquement pour déterminer les valeurs approchées des paramètres, d'autres ne les utilisent pas du tout, et les derniers les exploitent pour chaque mesure. La non-utilisation des données auxiliaires offre l'avantage de traiter directement un couple de films, sans utiliser de support magnétique annexe.

A part Haan qui utilise des fonctions spline, tous modélisent l'attitude par un polynôme, dont le degré varie de 0 à 3. Ce degré diffère parfois entre Tangage, Roulis et Lacet.

Un dernier élément distinguant les modélisations les unes des autres est le nombre de paramètres définis pour chaque scène (ou segment). Celui-ci dépend des trois points précédents. Il conduit au nombre minimum de points d'appui nécessaires. Enfin, certains modèles peuvent se passer de points d'appui, d'autres non.

Il faut enfin noter que certaines ont été évaluées sur des couples de segments ou sur des petits blocs, la plupart ne l'ont été que sur des couples de scènes.

Leur seul point commun serait l'équation de colinéarité, utilisée pour modéliser le rayon de visée.

8.2. Leurs caractéristiques

Nous ne présenterons pas en détail chacune des autres modélisations développées, leurs auteurs s'en chargent, mais nous préciserons les caractéristiques principales de chacune.

Afin d'insister sur la diversité des modélisations, nous en signalons 11 toutes différentes. Les 3 lettres indiquées entre parenthèses serviront de référence dans le tableau récapitulatif qui suit (Tab 6.2). La classification adoptée est basée sur la façon de modéliser le déplacement du satellite.

8.2.1. Trajectoire linéaire

La trajectoire de l'orbite est modélisée par une droite. Ce qui a l'avantage d'être un modèle très simple pour une première approche, trop simple pour exploiter toutes les possibilités géométriques du système Spot. Mais cette approche permet une adaptation plus rapide sur les restituteurs analytiques

$$S = S^0 + S^1.t$$

Le déplacement du satellite est décrit par six paramètres (S^0 , S^1). L'emploi des données auxiliaires de position n'est pas nécessaire.

8.2.1.1. Modélisation Konecny (KON)

C'est la modélisation développée par l'Université de Hannover (cf KRUCK 87, KONECNY 87, KONECNY 88) pour l'option Spot du logiciel Bingo de restitution photogrammétrique.

L'attitude est modélisée par 3 constantes.

Des paramètres auxiliaires de systématismes peuvent éventuellement être ajoutés, en nombre variable (5 en général) . Ils corrigent l'image d'une partie des effets non modélisés, dont les dérivées angulaires et la focale.

Ce qui mène à 9 (ou 14) le nombre total d'inconnues par scène.

8.2.1.2. Modélisation Liao (TWN)

Liao (cf LIAO 90) s'est basé sur la modélisation précédente (sans systématismes), mais a modifié la modélisation d'attitude en employant un polynôme de degré 1. ce qui donne 12 (= 6 + 6) inconnues au total.

On peut noter également l'emploi d'une valeur de focale équivalente à 1085.4 mm, donc très élevée, mais sans nul doute compensée par un éloignement du satellite.

Les résultats, sur un couple avec 78 contrôles plani et 195 contrôle alti sur Taïwan, s'élèvent à de 12 à 14 m en planimétrie et de 9 à 10m en altimétrie pour un nombre d'appuis allant de 9 à 4 (4 coins).

Liao a étudié l'influence du nombre d'appuis sur la précision de triangulation dans le couple : sa conclusion est que 4 points au 4 coins peuvent suffire, et qu'en rajouter 5 (1 au centre et 4 sur les milieux des côtés) mène à une configuration d'appui bien suffisante.

Cette modélisation est identique à celle préalablement développée par Chen (cf CHEN 87), lequel l'a ensuite affinée (cf LEE 88) en prévoyant un polynôme de degré 2 en position, de degré 3 en attitude, et en y adjoignant 2 coefficients d'erreur systématique linéaire en x et y ; ce qui porte là le nombre d'inconnues à 17 (=6+9+2). Sur un couple les résultats annoncés atteignent 7.4 m , 3.9 m et 7.7 m,

en X, Y et Z respectivement pour 24 points d'appui. Il conseille 20 à 25 points d'appui par couple.

Ceci est caractéristique de ce type de modélisation, très simple de mise en oeuvre, mais nécessitant l'introduction d'un nombre élevé de paramètres supplémentaires pour assurer la précision.

8.2.2. Trajectoire elliptique

La trajectoire du satellite durant la prise de vues est assimilée à une portion de cercle ou d'ellipse, définie par 4 à 6 paramètres, dont le centre de la Terre est un foyer.

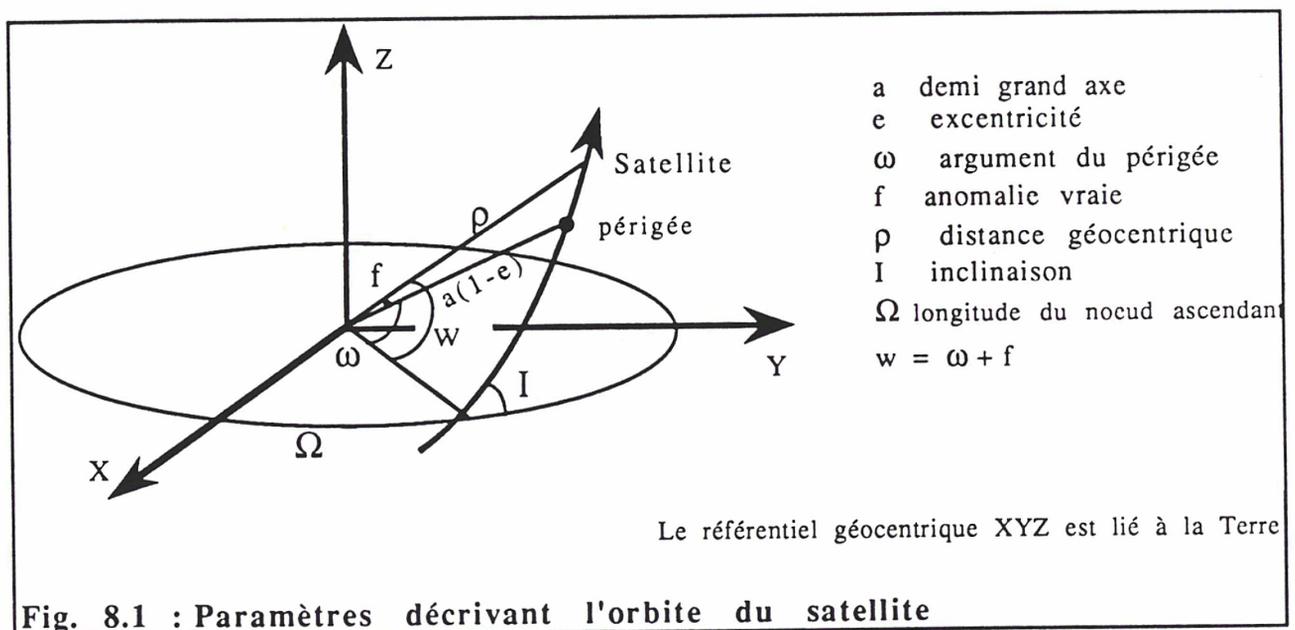


Fig. 8.1 : Paramètres décrivant l'orbite du satellite

Pour une orbite plane elliptique, e et ω sont constants. Pour une orbite circulaire, $e = 0$, et ω n'a plus de sens.

Restent donc 4 paramètres sur les 6 : a ou ρ , I , Ω , w ou f .

Le mouvement du satellite sur cette ellipse est défini par une variation linéaire en t de w (et de Ω , vu le choix du repère XYZ)

Il est équivalent de donner position et vitesse à l'instant t_0 , que de donner les 4 paramètres.

Modéliser l'orbite de cette façon, c'est supposer que le satellite est soumis au champ de pesanteur d'un objet ponctuel, placé au centre de masses de la Terre, ayant la masse de la Terre. En fait ce champ est perturbé, car la Terre n'est pas un objet à symétrie sphérique.

8.2.2.1. Modélisation Gugan (UCL)

Gugan (cf GUGAN 87, GUGAN 88, HAITZMAN 88, GUGAN 90) a développé pour l'University College London, une modélisation d'orbite eulérienne, définie par 4 paramètres. w et Ω sont supposés linéaires en temps.

L'attitude est modélisée par un polynôme de degré 1, soit 6 paramètres. Il est prévu de faire intervenir 0 à 6 de ces paramètres, ce qui permet d'assurer une modélisation avec deux points au minimum.

Son objectif étant de développer un logiciel Spot sur appareil analytique, seuls les deux films du couple, et leurs inscriptions marginales, sont nécessaires. Il n'utilise pas de données auxiliaires autres que l'angle d'incidence

8.2.2.2. Modélisation Trifid (TRI)

L'objectif de Trifid Co (cf NAGY 88, WILSON 89) est de traiter des blocs pour faire des mosaïques d'images rectifiées ; ces données n'offrent pas de stéréoscopie en général, bien que leurs tests aient porté sur des couples.

L'orbite est supposée plane et circulaire sur une scène. Cependant les inconnues retenues sont position et vitesse au centre de la scène (6 paramètres). La position pour chaque mesure en est déduite.

L'attitude est modélisée par un polynôme de degré 1 (6 paramètres).

Les dérivées en attitude fournies ne sont pas utilisées.

Aucun résultat n'est présenté sur un bloc, malgré les titres *Large area triangulation...* ou *Simultaneous block triangulation...* ; en revanche, sur couples, 8 à 11 m en planimétrie et 7 à 9 m en altimétrie, aux points de contrôle, avec 4 à 5 points d'appui sont annoncés.

8.2.3. Orbite perturbée

Ce qui diffère de l'approche précédente, c'est la prise en compte des perturbations du mouvement dues au champ de pesanteur terrestre, lors de l'expression des ces paramètres en fonction du temps. La perturbation principale provient de l'aplatissement de la Terre aux pôles : c'est le terme V_{20} du potentiel.

La trajectoire d'un satellite se définit alors par une ellipse dite osculatrice, dont les paramètres, dits osculateurs, varient sous l'influence de fonctions perturbatrices.

8.2.3.1. Modélisation Toutin Guichard (GT)

Guichard définit (cf GUICHARD 83, TOUTIN 85, GUICHARD 88, TOUTIN 90) 11 paramètres indépendants par orbite, auxquels 3 seront ajoutés pour un bisegment. Ces paramètres décrivent l'orbite de façon générale, simple et rigoureuse (d'après leurs auteurs), mais n'ont pas de signification physique simple.

Les points d'appui doivent être connus en XYZ.

L'objectif semble plus de reconstituer l'orbite du satellite pour elle-même que de densifier un réseau.

Pour la géométrie interne, une grille de facteurs correctifs a été ajoutée, corrigeant en principe la focale et le défaut d'orientation du HRV, en sus des variations d'attitude fournies. Cette correction est appliquée sur les images brutes avant tout traitement.

8.2.3.2. Modélisation Kratky (CCM)

L'approche adoptée par Kratky (cf KRATKY 88ab, KRATKY 89) est destinée à une exploitation d'un couple de films sans utilisation des données auxiliaires.

Pour la trajectoire, 3 inconnues de position du centre de scène sont gardées. L'attitude est modélisée par 9 paramètres : 3 d'angles d'attitude du satellite au centre de scène, puis 3 termes d'attitude linéaire en temps et 3 termes de degré 2 (éventuellement inutilisés).

Kratky a souligné l'imprécision régnant autour de la géométrie interne, et a ajouté 2 inconnues de géométrie interne (une de focale, une de défaut d'orientation)

Ce qui donne 14 paramètres par image (éventuellement 11).

Outre les équations image et terrain, les équations de contraintes introduites traduisent que la position centrale est celle qui est fournie, et que le satellite se déplace strictement le long de son orbite modélisée.

Le nombre minimal de points d'appui se situe entre 5 et 9. Cette modélisation ne converge pas sans appui.

La précision annoncée est de 5 à 6 mètres en planimétrie et 4 à 8 mètres en altimétrie.

8.2.3.3. Modélisation Priebbenow (QLD)

Priebbenow (cf PRIEBBENOW 88, PRIEBBENOW 89) définit l'orbite par 4 paramètres osculateurs $(\rho, I, \Omega, \omega)$, où e et ω sont supposés constants (calculés au début une fois pour toutes). Les données auxiliaires de positions et vitesses permettent la mise en place approchée initiale. De plus, à chaque itération, le temps de chaque mesure est réestimé.

Quant à l'attitude, il dissocie le degré à employer pour chacun des angles Tangage (degré 3 max), Roulis et Lacet (degré 2 max). Ces polynômes viennent compléter la valeur calculée à partir des dérivées en attitude fournies dans les données auxiliaires.

La recherche des degrés optimaux des polynômes pour la modélisation en attitude, le mène à retenir 2 en Tangage, 0 en Roulis, 0 en Lacet, soit $(3+1+1=)$ 5 paramètres.

La seule lacune serait la non prise en compte de l'imprécision de géométrie interne ; bien que la focale soit recalculée à partir des directions de visée des détecteurs extrêmes.

8.2.3.4. Modélisation Westin (SSC)

Cette modélisation (cf WESTIN 89, WESTIN 90), développée pour la Swedish Space Corporation, a pour objectif premier d'assurer une bonne qualité au traitement de niveau 3. Cette préoccupation fait suite à des besoins de raccords entre images adjacentes, et à des besoins de superposabilité d'images différentes couvrant une même zone. L'auteur arrive au constat suivant : même pour une rectification de niveau 3, la modélisation préliminaire doit être rigoureuse et se rapprocher le plus possible du modèle physique.

Cette modélisation est identique à la précédente pour la trajectoire (4 inconnues, position et vitesse fournies employées pour les valeurs initiales) ; elle n'en diffère qu'au niveau attitude où les degrés sont ici tous pris à 0 (3 inconnues de constante d'attitude, et utilisation des dérivées en attitude fournies).

Les résultats sur une scène, donnent 4m en planimétrie sur 80 appuis. Ces chiffres sont obtenus avec une procédure de choix et de pointé des points d'appui extrêmement soignée.

8.2.3.5. Modélisation Haan (MIL)

Au sein du Politecnico di Milano, Haan (cf HAAN 91, OEEPE 91) a développé cette modélisation paramétrée par les 6 valeurs de position et vitesse au temps initial. L'orbite est ensuite calculée par intégration. Les valeurs fournies permettent de déterminer des valeurs approchées.

La particularité de sa modélisation réside dans le traitement de l'attitude du satellite. Il utilise des fonctions spline de degré 3 pour modéliser l'attitude. Seule une constante angulaire d'attitude, doublée d'un léger biais en temps, est modélisée dans la compensation, tous les autres coefficients sont issus des valeurs de dérive en attitude fournies. On peut réduire à 3 le nombre d'inconnues d'attitude.

Quant à la géométrie interne, la focale f et les 4 angles Ψ_x et Ψ_y sont considérés comme inconnues, et contraintes à leur valeur nominale.

Les résultats sont de 15m en planimétrie et 13m en altimétrie.

8.2.4. Ecart à trajectoire fournie

C'est une modélisation basée sur les principes développés dans cette étude. Ce qui distingue ces modélisations est le degré en P et A retenu, ainsi que les inconnues écartées pour cause de corrélation.

La modélisation de l'orbite perturbée étant assurée dans les positions fournies, le point de vue adopté estime inutile de reprendre ce calcul

8.2.4.1. Modélisation Tateishi (TAT)

Tateishi (cf TATEISHI 88, AKUTSU 90) propose un modèle avec 6 inconnues par scène. Un de ses objectifs étant l'évaluation des possibilités de triangulation sans points d'appui, il propose éventuellement de ne garder que 6 inconnues pour un couple, en ne déterminant que les paramètres d'une scène (relativement à l'autre).

Pour l'écart à la position fournie par les éphémérides, 3 inconnues ; pour la constante d'attitude, 3 inconnues.

Il n'utilise pas les dérives en attitude fournies.

8.2.4.2. Modélisation Hottier Albattah (HAB)

Cette modélisation (Cf HOTTIER 88, ALBATTAH 89) est fort proche de celle développée dans cette étude. Elle en diffère en premier lieu par le choix du repère où sont écrites les relations d'observations: un repère "sol". Elle en diffère en second lieu par le choix des inconnues gardées : 3 inconnues de translation, une de lacet, et une d'anisotropie par segment. Ce choix a été motivé par la vitesse de convergence de la solution utilisant ce jeu de paramètres. De plus, aucune dérive en temps n'est prévue.

Les données initiales de position sont préalablement modélisées par un polynôme de degré 2.

8.2.4.3. Modélisation Pitch (HAN)

Pitch (cf OEEPE 91) a modifié la modélisation Bingo (KON) pour les essais OEEPE en se rapprochant de la nôtre comme suit : la trajectoire est reconstituée (polynôme) à partir des éphémérides, les variations d'attitude sont intégrées et seuls les termes constants (position et attitude) sont modélisés.

Position et Lacet initial sont les 4 inconnues. En effet, Tangage et Roulis sont fortement contraints à leurs valeurs nominales, par des équations d'information. Les 6 paramètres d'orientation sont considérés comme 'inconnues observées'.

Cinq paramètres de systématisme par scène peuvent être ajoutés pour affiner le modèle. C'est le point qui diffère de la modélisation précédente (HAB) qui intègre une inconnue d'anisotropie par segment.

Pour la géométrie interne les directions de visée des détecteurs extrêmes Ψ sont employés.

8.2.5. Récapitulation

Afin d'avoir une vue plus globale des différentes modélisations, un tableau récapitulatif (Tab 6.2) a été dressé. Les trois thèmes retenus pour les distinguer sont en premier, le nombre et le type d'inconnues, en second, l'utilisation des données auxiliaires, ou éphémérides de position et vitesse, et en troisième, l'utilisation des données de dérive en attitude fournies.

La plupart des modélisations ont été élaborées pour traiter des scènes et non des segments ; leur emploi pour des segments pourrait amener à y ajouter des paramètres de vitesse (ou de degré 1 en P).

Pour chaque modélisation, sont d'abord rappelés : le nombre total d'inconnues, le nombre d'inconnues relatives à la position du satellite (position, écart à la position fournie, ou paramètres d'orbite, et vitesse), le nombre d'inconnues relatives à l'attitude, enfin le nombre d'inconnues relatives à la géométrie interne de la prise de vues. Le mode de modélisation n'a pas été rappelé.

Quant à l'utilisation des données auxiliaires de position, trois cas se présentent : soit elles ne sont pas utilisées du tout, soit elles sont utilisées pour toutes les mesures car c'est l'écart à cette position fournie qui est modélisé, soit elles sont utilisées pour déterminer les valeurs approchées initiales des paramètres recherchés.

De même pour l'emploi des données auxiliaires d'attitude, trois cas sont séparés : la non utilisation, l'utilisation par intégration des données fournies, ou la remodelisation de la dérive en attitude.

Au delà de la modélisation proprement dite, les modes de calcul diffèrent. Certains (dont Tateishi) modélisent indépendamment les faisceaux avant d'intersecter les points, et n'effectuent pas, même pour un couple, de compensation globale. D'autres (dont Dowman in OEEPE 91) effectuent une pseudo compensation de bloc en modélisant d'abord des couples de segments, puis ajustent ces couples les uns par rapport aux autres pour assurer les raccords.

En matière de points, certains n'utilisent que des points connus, d'autres ajoutent des points de liaison (Priebbenow préconise d'ailleurs, pour un couple, 6 points-terrain et 9 à 16 points de parallaxe).

Méthode	HAN	HAB	TAT	IGN	SSC	KON	QLD	UCL	GT	TRI	MIL	TWN	CCM
Approche : modélisation de la trajectoire													
1 Linéaire $S = SO + S1.t$													
2 Circulaire													
3 orbite képlérienne													
4 $S = Séph + P (+ V.t)$					V								
Nbre d'inconnues	4	5	6	7	7	9	9	10	11	12	12	12	14
Position (Vitesse)	3	3	3	(3)	4	6	4	4		6	4	6	3
Attitude	1	1	3	3	3	3	5	6		6	=3	6	9
Géométrie interne		1		1		(+5)					5		2
Ephémérides position vitesse													
non utilisées						?		X				?	X
en chaque point	X	X	X	X									
pour valeurs approchées					X		X		X	X			
Dérives en attitude													
non utilisées			X			?		X		X		?	X
A = Aeph+...	X	X		X	X		X						
autre modélisation									X		X		
étude comparative	HAN			IGN			QLD	UCL			MIL		CCM

Tab 8.2 : Résumé des caractéristiques des diverses modélisations

8.3. Les résultats annoncés

Tous annoncent que le 1:50000 est possible. Mais les résultats expérimentaux vont en planimétrie de 4 à 13 mètres et en altimétrie de 4 à 12 mètres.

Les évaluations de la plupart de ces modélisations n'ont porté que sur des couples de scènes, voire de segments. Seules quatre d'entre elles (QLD,HAN,TRI,HAB) annoncent des résultats sur un bloc, et deux seulement sur un bloc bien équipé (en points de contrôle) de 4 segments (2 couples de segments)

Un même bloc (mêmes points, mêmes images) a été compensé par Priebbenow(QLD), Pitch(HAN),et nous(IGN) (cf OEEPE 91). Aucun des trois n'a sélectionné la même configuration d'appui allégée. Et Pitch n'a pas donné de

chiffres pour le calcul avec tous les points en appui. Les résultats en sont cependant présentés ci-dessous (Fig. 8.3.).

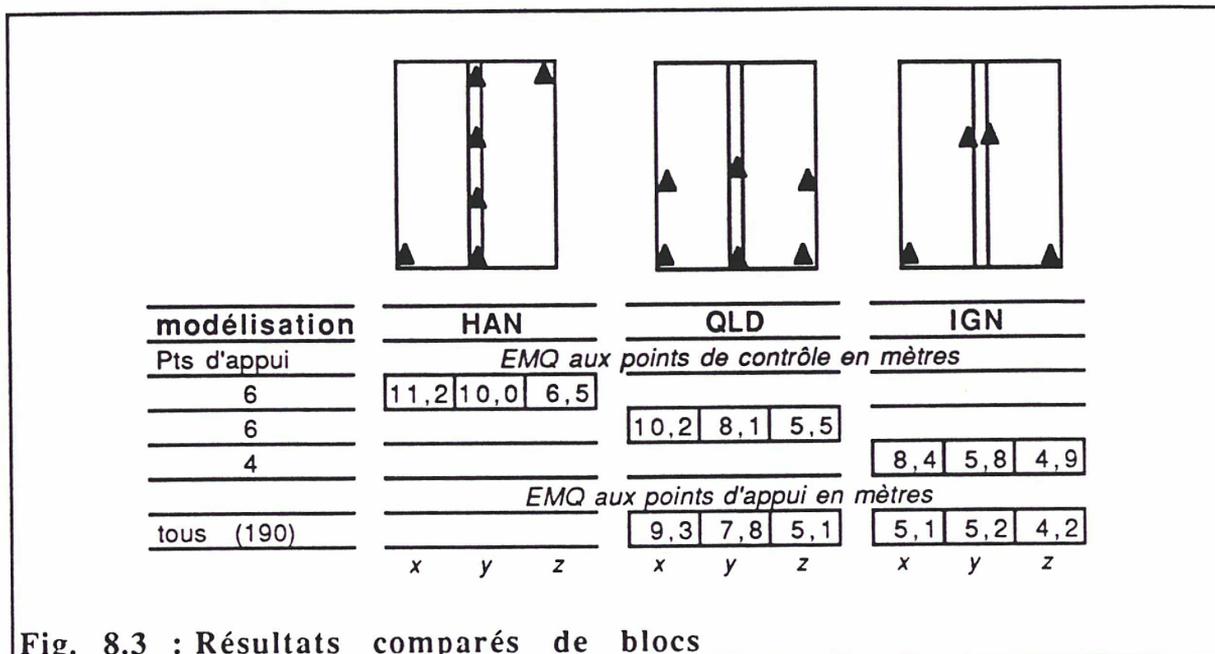


Fig. 8.3 : Résultats comparés de blocs

La diversité d'équipement terrain, la diversité des matériels utilisés pour observer les points sur les images Spot rendent difficiles toute évaluation fine de performances de ces modélisations. Seule les résultats de chacune des modélisations sur un même jeu de données expérimentales peuvent permettre une comparaison.

8.4. Une étude comparée

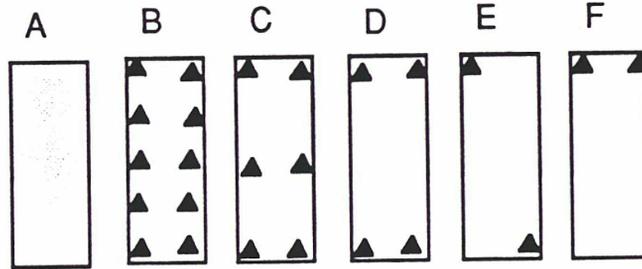
Dans le cadre d'essais menés à l'instigation de l'OEEPE (Organisation Européenne d'Etudes de Photogrammétrie Expérimentale), un même jeu de données a été exploité avec les différentes modélisations. Il s'agit d'un couple de segments, de quatre scènes de long, équipé d'une centaine de points-terrain.

Les mêmes configurations d'appui ont été utilisées, dans un premier temps, chacun faisant ses mesures, et dans un second temps, chacun exploitant un jeu de mesures (médiocre, certes) unique. Entre les deux séries, certains ont fait évoluer leur modèle. La présentation détaillée des essais et données figure en Annexe 3.

Les six modélisations comparées, sont répertoriées de la façon suivante:

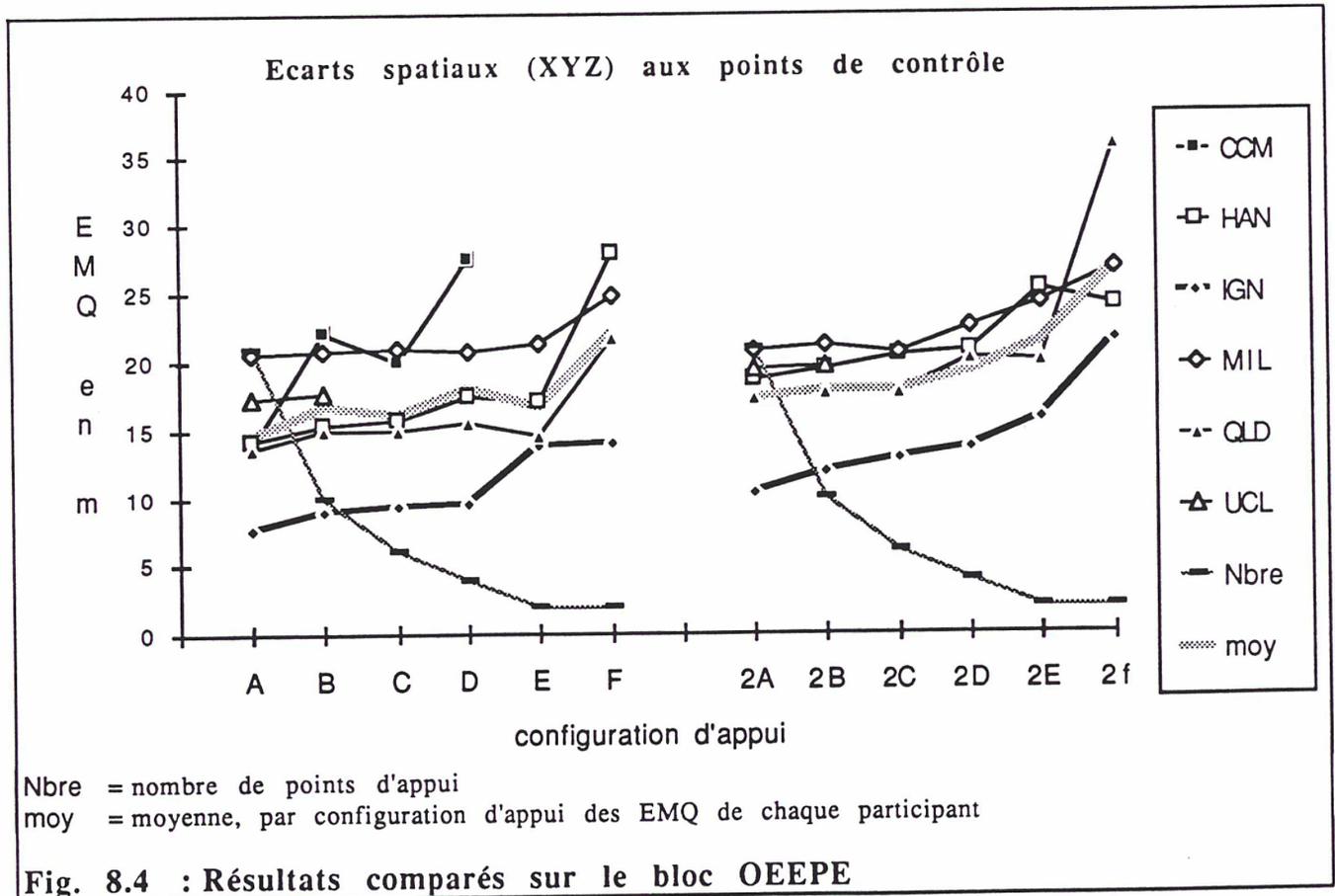
- | | |
|---|----------------------------|
| CCM : Canadian Center of Mapping | -> modélisation Kratky |
| HAN : Hannover university | -> modélisation Pitch |
| IGN : modélisation présentée dans cette étude | |
| MIL : Politecnico di Milano | -> modélisation Haan |
| QLD : Queensland Dept of Lands | -> modélisation Priebbenow |
| UCL : University College London | -> modélisation Gugan |

Les configurations présentées ici sont schématiquement les suivantes :



où chaque triangle représente un point d'appui,
 où le grisé en A signifie que le réseau d'appui est dense (21 points)

La figure 8.2 donne pour chaque centre la moyenne quadratique des écarts, en distance dans l'espace, aux points de contrôle.



Les modèles réagissent plus ou moins bien à une forte diminution des appuis (de 21 à 2). La modélisation CCM ne permet pas d'utiliser moins de 4 appuis.

La seconde série de calculs, supprimant les différences d'identification des points entre observateurs, est moins dispersée que la première, bien que globalement moins bonne pour des raisons détaillées en annexe. Ceci souligne l'importance de la qualité des mesures dans le résultat final.

Même en ne considérant que les configurations à plus de 4 appuis, et sans tenir compte des calculs du CCM, la dispersion reste forte entre les résultats des 5 centres :

en mètres	écarts XY	écarts Z	configurations
mesures différentes	de 6.6 à 16.5	de 3.6 à 14.8	A B C D
même mesures	de 9.0 à 18.1	de 5.2 à 15.1	2A 2B 2C 2D

Un examen des courbes des écarts planimétriques d'une part et altimétriques de l'autre, fournies en annexe, montre une dispersion plus forte sur les écarts en Z qu'en XY. Les modèles ont des résultats plus rapprochés en planimétrie qu'en altimétrie.

Le modèle développé dans cette étude, référencé IGN sur le graphique, restant largement en deçà de la moyenne, semble donner d'excellents résultats.

Une modélisation relativement simple, paramétrant la position du satellite par un écart à la position fournie dans les éphémérides, garantit cependant une bonne précision.

Un seul jeu d'essai ne peut permettre aucun classement en termes de performances des différentes modélisations. Cependant cette étude comparative permet de confirmer la validité du modèle présenté dans les chapitres précédents.

9. Conclusion

c'était possible

Une réponse est donnée à la question posée au début (cf 1.) : il est bien possible de faire des calculs "d'aérotriangulation" avec des images Spot. Un calcul global de bloc, permet, à l'aide d'un nombre restreint de points d'appui (un par scène en moyenne semble convenir à un bloc 'compact'), d'assurer une précision de triangulation homogène sur le bloc, équivalente à celle obtenue sur un couple isolé dans les mêmes conditions (de B/H et de précision de points d'appui). Notre objectif est donc atteint.

Cette précision de triangulation, pour les images Spot, est inférieure à 10 m en planimétrie et 6 m en altimétrie (avec $B/H > .8$), ce qui entre dans les spécifications géométriques de la plupart des standards de cartographie 1:50000.

Cette précision est même atteinte avec un équipement terrain allégé constitué d'un point (bien identifié, et bien déterminé) par segment en moyenne.

comment

Pour obtenir cette précision sur un bloc, notre recherche de la modélisation optimale a abouti à retenir 7 paramètres par segment.

Cette modélisation de la prise de vues Spot allie:

la proximité de la réalité physique de la prise de vues, nécessitant l'introduction d'une inconnue de focale,

la robustesse, en traitant les inconnues corrélées,

et la simplicité, en évitant l'emploi des paramètres osculateurs d'un mouvement képlérien perturbé.

Ce choix, rendu nécessaire par les constatations expérimentales, s'appuie sur les caractéristiques du système Spot. Les calculs expérimentaux l'ont ensuite confirmé.

Les essais ont montré la bonne stabilité altimétrique : il n'est pas nécessaire de disposer de plus d'appuis altimétriques que planimétriques, comme c'est le cas en aérotriangulation.

Le calcul par spatiotriangulation de blocs sans appui est possible, et donne une précision de 15 mètres en altimétrie et en planimétrie.

et après

Les prolongements possibles de cette étude pourraient être les suivants :

1. évaluer et expérimenter ce qu'apportera Doris, c'est à dire la connaissance précise de l'orbite et donc de la position du satellite, bien qu'a priori (cf 6.3.3), cela n'apporte rien directement.

Au minimum, Doris permettra de dissocier l'ordre de grandeur des erreurs de position et de celui des erreurs d'attitude (et de confirmer le choix fait dans cette étude en matière d'inconnues). De plus, Doris permettra d'étalonner la géométrie interne du système de prise de vues tant au niveau de la focale que du biais inter HRV en visée oblique. Il reste probable qu'une exploitation régulière sans Doris soit ensuite retenue.

2. évaluer et expérimenter ce qu'apporte réellement une prise de vues biHRV, ceci complètera nos réflexions du 6.3.4.

3. évaluer ce modèle sur de très longs segments. Le problème est alors de disposer de coordonnées de points de contrôle dans un même système tout au long de la trace, sur 600 à 1000km, voire plus.

4. évaluer rigoureusement la précision des différents groupes de mesures, comme nous le mentionnons en 6.4.5.1

5. calculer un bloc observé en stéréoscopie sur images numériques, avec éventuellement pointé assisté par corrélation automatique locale, afin d'éviter les aléas des pointés sur films (cf 6.4.2). Au delà de ces "bonnes" mesures, il serait souhaitable également de préparer très soigneusement les liaisons de ce bloc (cf 7.5), pour éviter tout doute. Enfin, un bloc équipé de points de contrôle permettrait de tirer des conclusions certaines.

Il ne s'agit, en fait ici, que de disposer du bloc de test 'parfait', bien lié, bien équipé, et surtout bien mesuré (cf 7.1.1).

6. étudier comment peut être exploitée la possibilité offerte par le système Spot, comme par d'autres systèmes spatiaux de localisation, de déterminer la

surface terrestre (sol que nous foulons) dans un système géocentrique terrestre (lié à la Terre). Ceci pourrait conduire à évaluer si un bloc d'images Spot peut permettre de définir plus précisément le géοïde, à la précision de triangulation Spot, au mieux bien sûr (cf 7.2.2).

alors pour quoi

Hormis des applications marginales, c'est le contenu de l'imagerie Spot qui reste primordial. La géométrie ne fait que compléter l'image.

La géométrie du système Spot constitue son atout majeur. Bien que n'ayant pas été conçu pour la stéréoscopie, ce système a montré ses possibilités en ce domaine.

Il serait dommage de ne pas les exploiter à fond, même pour des applications thématiques.

D'ailleurs, les sociétés de traitement d'images commencent à comprendre l'intérêt qu'il y a à traiter géométriquement les images avec précision, que ce soit pour rectifier des images de niveau 3 ou pour extraire des modèles numériques de terrain (Cf STX 91, WESTIN 91, CHAVEZ 91), même pour ne les traiter qu'individuellement ou par couple.

Si le besoin de traiter des zones étendues de la sorte se manifeste, le recours à un calcul de bloc sera nécessaire. La qualité de modèles de terrain, sur zone étendue, issus de Spot, aussi bien que celle de mosaïques de niveau 3 (ou 2), ne sera garantie que par une compensation globale préalable.

Pour finir, rappelons le point qui reste ici le plus important, pour un calcul de bloc : il n'y a pas de bloc sans liaison. La stéréo avant/arrière prévue sur de prochains satellites Spot aidera à résoudre une partie des difficultés, notamment d'exploitation, mais ne fera pas tout.

Annexes

Annexe 1 les essais ADEF

Présentation

Le bloc ADEF est le bloc d'expérimentation acquis et équipé par l'IGN, pour tester la spatiotriangulation, dans le cadre plus vaste de l'Action de Développement, Evaluation, Formation sur Spot (ADEF). Les principaux résultats de l'ensemble des études menées dans le cadre de cette action sont rassemblés dans le Bulletin d'Information de l'IGN n°57 (sept 89).

Ce polygone d'essais de spatiotriangulation se situe dans le Sud-Est de la France. Cette zone fut choisie pour son temps plus clémente promettant une acquisition plus aisée. Il s'étend des Alpes à la Méditerranée et au Massif Central, de Grenoble à Aix-en-Provence et du Puy à Montpellier ; soit encore 220km du Nord au Sud et 200km d'Est en Ouest.

Images Spot

Le polygone d'essais est composé principalement de 4 couples de segments de 4 scènes de long chacun, auxquels il faut ajouter un segment quasi-vertical sur la bande Est. La carte A1.1 localise les scènes. La table A1.2 détaille pour chacune des scènes référence, position, date et angle de prises de vues et indicateur de couvert nuageux.

Toutes ces images sont panchromatiques.

Ces images ont été acquises bande stéréoscopique par bande stéréoscopique, d'Est en Ouest, à l'été 86, au printemps et à l'automne 87 et à l'été 88. Ces bandes sont référencées respectivement 50, 49, 4748, 46, d'après le chiffre K identifiant les scènes qui les composent.

Le bloc ADEF lui-même est composé des 32 scènes obliques. Le rapport B/H est supérieur à 0.8, pour une bonne stéréoscopie dans chaque bande.

Qualité des images

Malgré tout le soin porté à cette programmation, les images acquises ne sont pas exemptes de nuages. L'indice de couverture nuageuse, noté de 0 (sans) à 2 (nuages) par quart de scène le montre bien. Les données ne sont pas correctes pour une restitution photogrammétrique, mais elles permettent cependant des essais de géométrie en choisissant des points hors zone nuageuse. Lorsque la zone nuageuse couvre une partie importante de l'interbande, ce qui est le cas sur le Nord de l'interbande 49 / 50, il est impossible d'assurer une bonne liaison.

De plus, l'écart entre dates de prise de vues d'une bande à l'autre a parfois considérablement gêné le choix et le pointé de points interbandes ; car la radiométrie des images est radicalement différente entre printemps et automne (lien entre 4748 et 49). La neige présente sur le massif des Ecrins n'a pas été d'une grande gêne.

Equipement terrain

L'équipement terrain a été réalisé au fur et à mesure de l'acquisition du bloc. Le nombre de points finalement répertoriés s'élève à 560 environ.

Choix

Tous ces points-terrain étaient destinés à être indifféremment utilisés comme points d'appui ou de contrôle. Aucune distinction n'a été faite lors de leur choix. Ils ont été choisis (sauf exception mentionnée ci-dessous) en stéréoscopie sur des tirages papier (1:200000) des films Spot.

Ces points sont en très grande partie connus en XYZ. Cependant certains ne le sont qu'en XY ou qu'en Z.

La figure A1.3 distingue les points XYZ, des points XY, et des points Z, et mentionne des points inutilisés. Cette distinction ne relève pas de la collecte des points mais de leur utilisation pour la suite des tests. Elle révèle les relations terrain éliminées du jeu test, car présumées incorrectes (cf calcul de référence).

Répartition

La figure A1.3 montre la localisation de ces points. La densité non régulière est due pour partie aux sources disponibles (la densité est plus forte là où les points sont issus des cartes topographiques), pour partie à la couverture nuageuse, et pour partie aux aléas d'un travail échelonné sur deux ans et effectué par des opérateurs différents.

Origine

Ces points sont de quatre origines différentes :

1. Points choisis et déterminés par stéréopréparation terrain (une trentaine)

Une première tentative de stéréopréparation de terrain a été réalisée en juillet 87. La difficulté en a été l'identification sur le terrain de détails pointables et déterminables rapidement par des méthodes classiques de topométrie.

2. Points choisis sur clichés aériens 1:30000, et déterminés par aérotriangulation (une cinquantaine)

Pour les zones sur lesquelles existaient des blocs récents d'aérotriangulation, cette méthode a été retenue, car elle est meilleure que les points de carte. Il s'agit, en effet des blocs photogrammétriques préparés pour réaliser la cartographie 1:25000. L'identification des points entre cliché et image Spot est

facile, plus facile que l'identification terrain/Spot, ou carte/Spot. La détermination des coordonnées par aérotriangulation est un peu moins précise que sur le terrain, mais meilleure que sur la carte.

3. Points préparés pour la recette en vol, déterminés sur couples de clichés aériens 1:60000, mais sélectionnés sans image Spot. Tous n'étaient pas bien identifiables sur les images. Leur précision est moindre qu'avec les clichés 1:30000.

4. Points extraits de cartes 1:25000 choisis sur les images du bloc.

Qualité

Les seuls chiffres que l'on peut donner sur la qualité géométrique de ces points concernent la précision de détermination. Soit en écart-type estimé:

Type de point	1	2	3	4
planimétrie	3 m	2 m	4 m	5 m
altimétrie	2 m	2 m	2 m	2 m

Il est impossible de chiffrer précisément leur précision d'identification.

Mesures

Les mesures ont toutes été effectuées sur film Vizircolor 1A généré à l'IGN, en stéréoscopie sur restituteur analytique Matra Traster. Elles ont été faites au fur et à mesure de l'acquisition et de l'équipement des bandes.

Points-terrain : chaque point a été observé sur toutes les images sur lesquelles il apparaissait.

Points de liaison : des points, dits points homologues ou points de parallaxe, communs aux deux images d'un couple ont été observés.

des points spécialement choisis pour assurer la liaison entre bandes ont été préparés là où les points-terrain ne pouvaient assurer à eux seuls la liaison.

A noter :

1. Les bandes 50 et 49 d'une part, 4748 et 46 de l'autre n'ont pas été observées avec les mêmes fichiers de fond de chambres déclarés. Les mesures brutes n'étant pas conservées, il n'a pas été possible de revenir sur les erreurs commises sur les observations des deux premières bandes. Cela entraîne une affinité de l'ordre d'un pixel sur l'image. Seule une compensation globale a permis de déceler cette anomalie qui ne remet pas en cause les résultats obtenus.

2. Le mode d'observation utilisé sur le Traster, vu le grand nombre de points à observer, ne permet pas d'annuler la parallaxe transversale (parallèle à la trajectoire Spot). Celle-ci garde la valeur obtenue sur le modèle calculé avec les

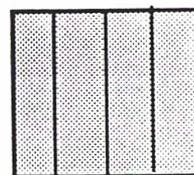
premiers points observés. Ceci induit une valeur résiduelle plus importante pour la valeur 'y' des résidus d'observation. Là encore, ceci ne doit pas remettre en cause les résultats obtenus.

Calculs

Calculs avec tous les points en appui et sans appui, effectués avec la modélisation 2 (A,V,F) :

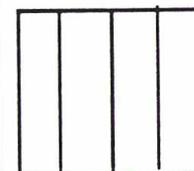
A D E F	ECARTS AUX POINTS D' APPUI			
nbre de points	4 9 3			5 1 4
écart moyen		0,1	0,1	0,0
écart min		-16,7	-16,9	-9,9
écart max		15,2	14,3	11,4
E M Q	7,9	5,7	5,5	4,2
en mètres	XY	X	Y	Z
E C T				

ECARTS AUX POINTS DE CONTROLE			
	0		0
	XY	X	Y Z



A D E F	ECARTS AUX POINTS D' APPUI			
nbre de points	0			0
écart max				
E M Q				
en mètres	XY	X	Y	Z
E C T				

ECARTS AUX POINTS DE CONTROLE			
	493		514
		58,1	-359,1 462,2
	363,9	58,6	359,2 462,4
	XY	X	Y Z
	7,5	7,5	7,8 14,1



Sont présentés, page suivante, les résultats d'une série de calculs destinés à chercher la modélisation minimale envisageable pour ce bloc ADEF :

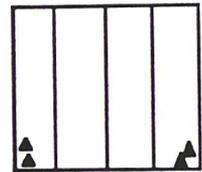


A D E F	ECARTS AUX POINTS D' APPUI			
nbre de points	4		4	
écart moyen	0,1	-0,3	0,2	
écart min	-5,1	-2,6	-2,9	
écart max	4,4	1,4	2,4	
EMQ	4,2	3,9	1,5	2,0
	XY	X	Y	Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE CONTROLE			
489		510	
-3,9	0,1	-24,8	
-25,2	-18,8	-43,9	
18,3	15,3	10,0	
10,0	8,2	5,8	18,6
XY	X	Y	Z

9,2 7,2 5,8 11,5

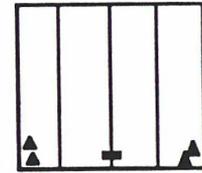


A D E F	ECARTS AUX POINTS D' APPUI			
nbre de points	4		5	
écart moyen	0,1	-0,3	0,9	
écart min	-5,0	-2,6	-3,0	
écart max	4,3	1,3	5,7	
EMQ	4,2	3,9	1,5	3,2
	XY	X	Y	Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE CONTROLE			
488		509	
-3,4	0,3	-8,1	
-23,9	-18,4	-27,3	
18,0	15,3	22,6	
9,7	7,8	5,8	9,2
XY	X	Y	Z

9,1 7,0 5,8 9,0

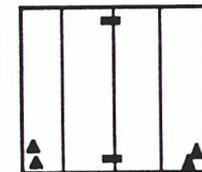


A D E F	ECARTS AUX POINTS D' APPUI			
nbre de points	4		6	
écart moyen	0,1	-0,3	0,5	
écart min	-5,1	-2,6	-3,2	
écart max	4,2	1,3	6,5	
EMQ	4,2	3,9	1,5	3,4
	XY	X	Y	Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE CONTROLE			
487		508	
-3,1	0,3	2,0	
-23,8	-18,5	-22,0	
18,2	15,5	22,2	
9,7	7,7	5,9	7,7
XY	X	Y	Z

9,1 7,0 5,8 7,4

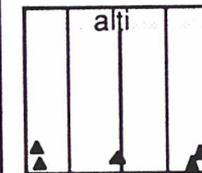


A D E F	ECARTS AUX POINTS D' APPUI			
nbre de points	5		11	
écart moyen	0,1	-0,2	0,3	
écart min	-5,5	-2,5	-5,9	
écart max	4,3	1,4	8,4	
EMQ	3,8	3,6	1,3	4,2
	XY	X	Y	Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE CONTROLE			
481		502	
-5,6	0,8	2,4	
-26,3	-17,3	-15,5	
16,6	15,9	25,6	
10,9	9,2	5,8	7,4
XY	X	Y	Z

9,4 7,4 5,8 7,0

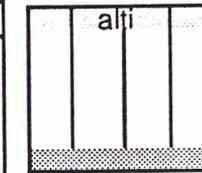


A D E F	ECARTS AUX POINTS D' APPUI			
nbre de points	9		15	
écart moyen	0,4	-0,4	0,0	
écart min	-5,4	-3,5	-5,4	
écart max	4,2	3,0	8,8	
EMQ	3,6	3,1	1,8	3,7
	XY	X	Y	Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE CONTROLE			
477		498	
-6,0	0,4	-0,9	
-29,3	-21,4	-14,8	
15,8	15,8	14,2	
11,8	10,1	6,1	5,3
XY	X	Y	Z

10,2 8,2 6,1 5,2

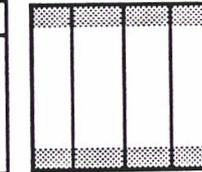


A D E F	ECARTS AUX POINTS D' APPUI			
nbre de points	12		16	
écart moyen	0,4	-0,2	-0,2	
écart min	-6,8	-5,2	-5,5	
écart max	8,5	3,6	8,0	
EMQ	5,1	4,4	2,5	3,7
	XY	X	Y	Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE CONTROLE			
477		498	
-1,1	0,8	-1,0	
-20,6	-21,3	-15,1	
20,6	16,2	13,7	
9,2	6,9	6,1	5,3
XY	X	Y	Z

9,1 6,8 6,1 5,2



A1.1 : Polygone ADEF Localisation des scènes Spot acquises

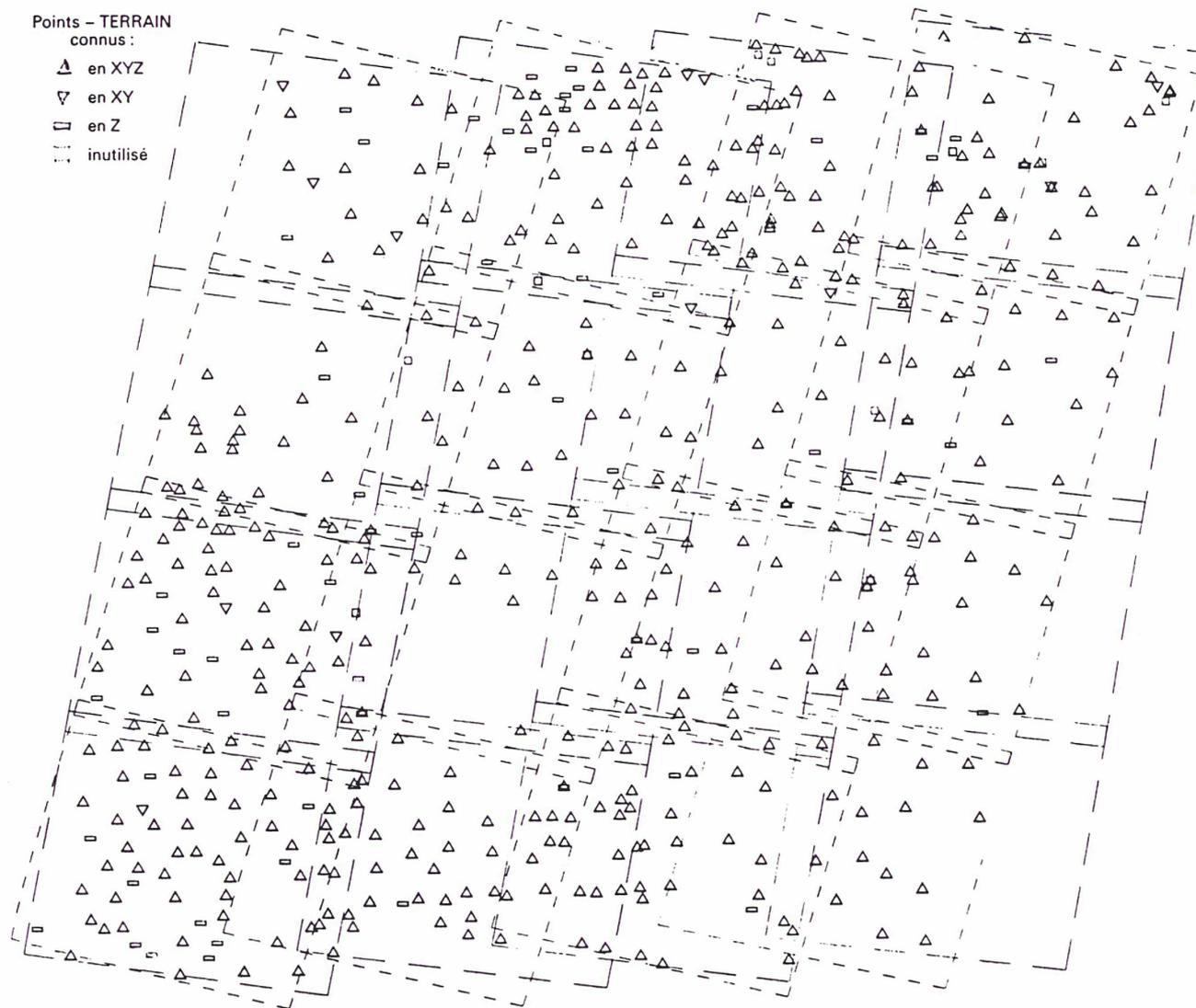


A 1.2 : Polygone ADEF Références des scènes Spot acquises

K - J	Date et Angle de prise de vue		Centre de scène en °''		Couverture Nuageuse
A. Triplet stéréoscopique 50					
050-259	du 28.07.86	20.5°E	N0450713	E0055700	0000
050-260	du 28.07.86	20.5°E	N0443820	E0054348	0000
050-261	du 28.07.86	20.5°E	N0440924	E0053047	0000
050-262	du 28.07.86	20.5°E	N0434026	E0051757	0000
050-259	du 03.09.86	6.7°E	N0450713	E0055947	0000
050-260	du 03.09.86	6.7°E	N0443820	E0054808	0000
050-261	du 03.09.86	6.7°E	N0440944	E0053638	0000
050-262	du 03.09.86	6.7°E	N0434026	E0052517	0000
050-259	du 30.08.86	22.3°W	N0450713	E0060222	2110
050-260	du 30.08.86	22.3°W	N0443820	E0055345	0000
050-261	du 30.08.86	22.3°W	N0440924	E0054514	0201
050-262	du 30.08.86	22.3°W	N0434026	E0053647	0000
B. Couple stéréoscopique 49					
049-259	du 19.04.87	22.6°E	N0450713	E0052905	1202
049-260	du 19.04.87	22.6°E	N0443820	E0051536	1202
049-261	du 19.04.87	22.6°E	N0440944	E0050218	0100
049-262	du 19.04.87	22.6°E	N0434026	E0044912	0000
049-259	du 26.04.87	21.7°W	N0450713	E0051353	0202
049-260	du 26.04.87	21.7°W	N0443820	E0050511	0200
049-261	du 26.04.87	21.7°W	N0440944	E0045635	0000
049-262	du 26.04.87	21.7°W	N0434026	E0044803	0000
C. Couple stéréoscopique 4748					
048-259	du 18.11.87	23.5°E	N0450713	E0044208	1011
047-260	du 18.11.87	23.5°E	N0443820	E0042832	1100
047-261	du 18.11.87	23.5°E	N0440944	E0041508	0000
047-262	du 18.11.87	23.5°E	N0434026	E0040157	0000
047-259	du 29.09.87	24.1°W	N0450713	E0043935	0000
048-260	du 29.09.87	24.1°W	N0443820	E0043111	0000
048-261	du 29.09.87	24.1°W	N0440924	E0042252	0000
048-262	du 29.09.87	24.1°W	N0434026	E0041437	0000
D. Couple stéréoscopique 46					
046-259	du 04.08.88	20.5°E	N0450713	E0040056	0110
046-260	du 04.08.88	20.5°E	N0443820	E0034743	2000
046-261	du 04.08.88	20.5°E	N0440924	E0033441	0000
046-262	du 04.08.88	20.5°E	N0434026	E0032150	0000
046-259	du 20.06.88	23.5°W	N0450713	E0035034	1110
046-260	du 20.06.88	23.5°W	N0443820	E0034205	1101
046-261	du 20.06.88	23.5°W	N0440924	E0033341	1111
046-262	du 20.06.88	23.5°W	N0434026	E0032521	1110

A 1.3 : Bloc ADEF . points-terrain

ADEF – POLYGONE D'ESSAIS DE SPATIOTRIANGULATION (AIX-EN-PROVENCE, GRENOBLE, LE PUY, MONTPELLIER)



A 1.4 : Bloc ADEF . origine des points-terrain

1. stéréopréparation de terrain	2. aérotriangulation 1:30000
3. aérotriangulation 1:60000	4. points de cartes 1:25000

Points - Terrain
 conduits :

△ en XYZ

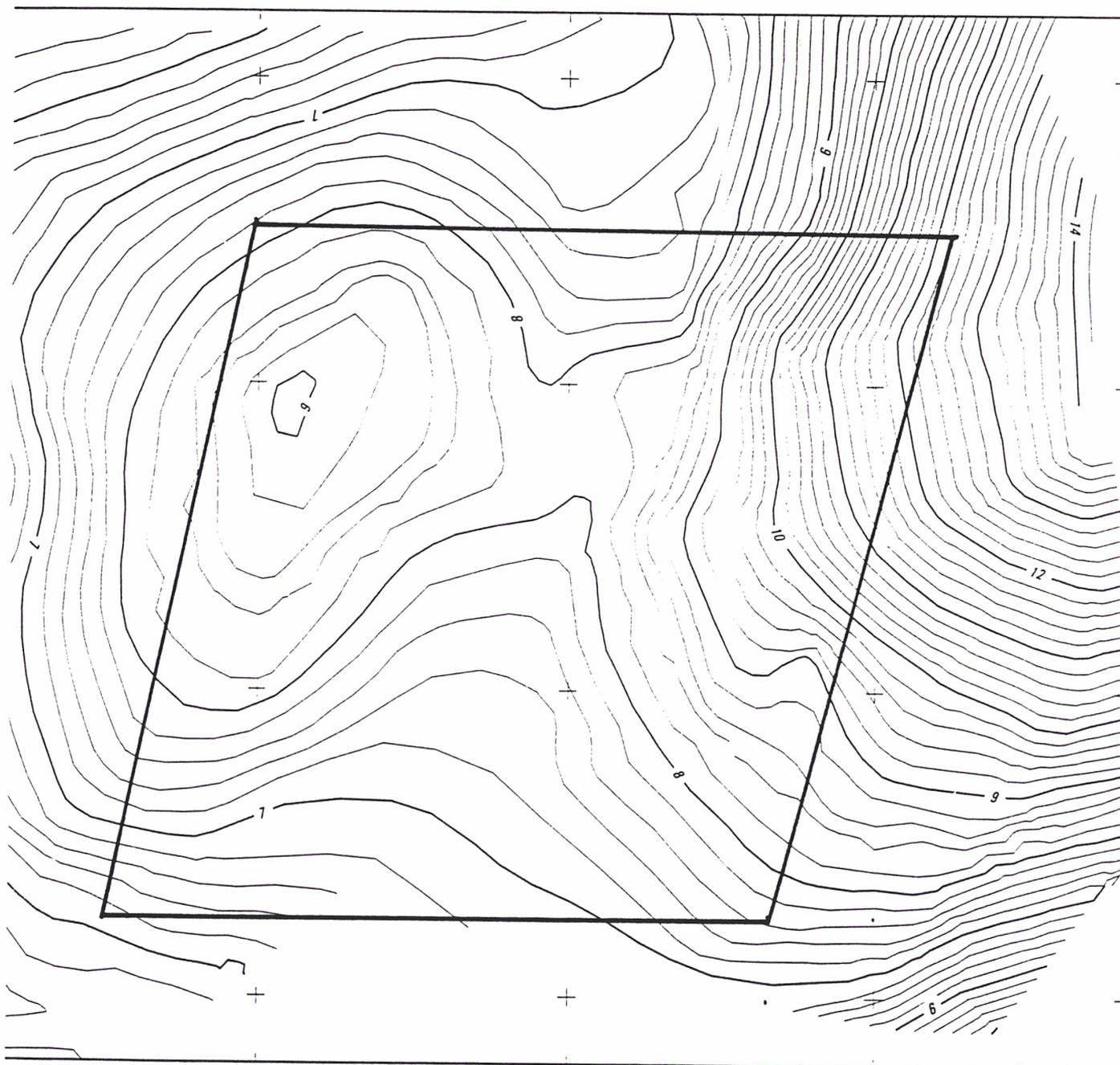
▽ en XY

□ en Z

□ multi-usage



A 1.5 : Bloc ADEF . carte du géoïde



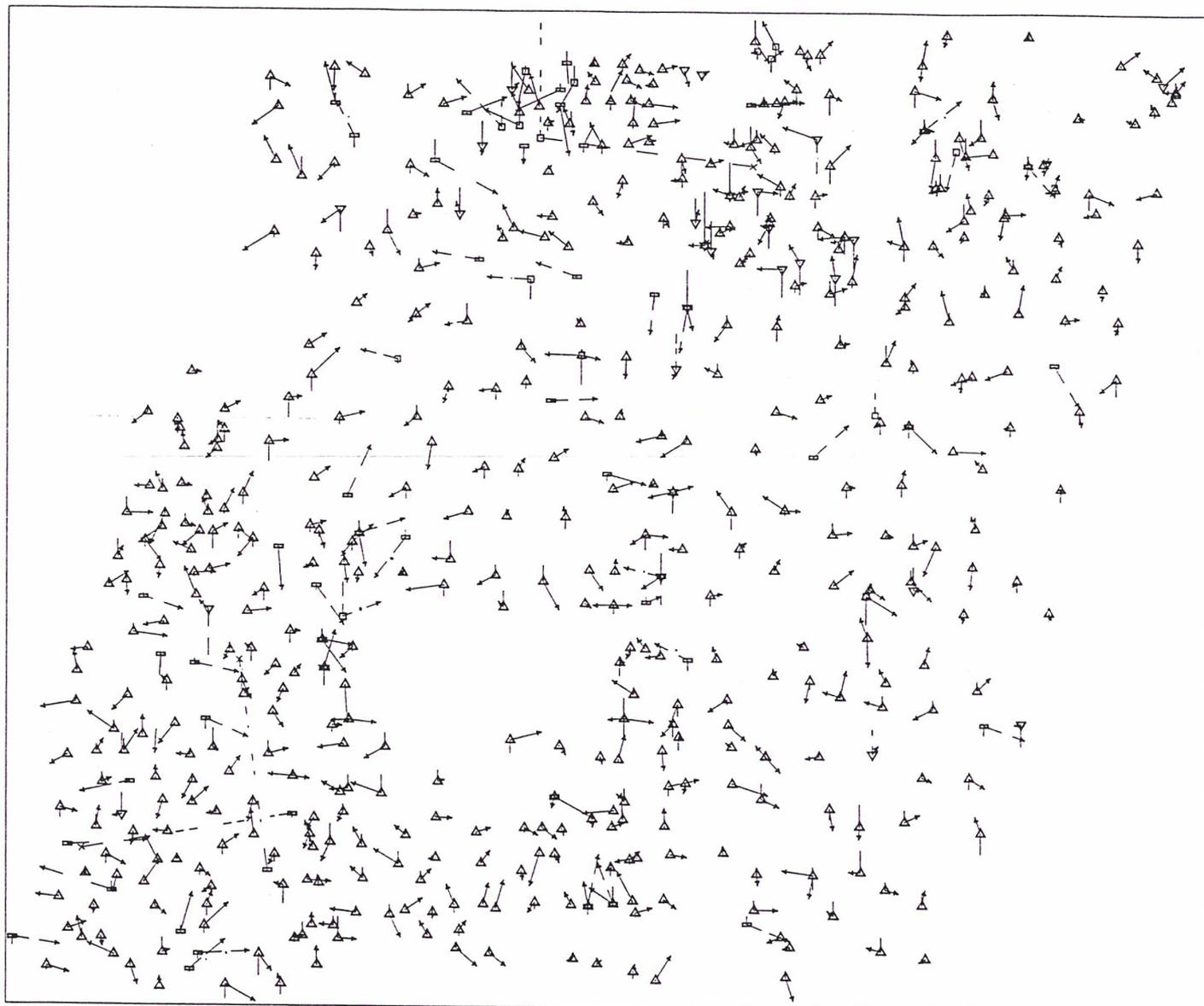
1 : 2000000

© I.G.N. Paris 1988

Equidistance des courbes : 20 cm

Lambert III

A1.6 : Bloc ADEF . calcul de référence . graphe des écarts



Points TERRAIN :	Ecarts TERRAIN :
△ en XYZ △	
▽ en XY ▽	<p>ecart altimétrique</p>
= en Z =	<p>ecart planimétrique</p>
□ inutilisé □	
pput controle	actif inactif

Annexe 2 les essais franco-canadiens

Présentation

Dans le cadre d'une coopération franco-canadienne sur les applications topographiques des données Spot, des données ont été échangées afin de comparer les méthodes des deux parties. (Cf KRATKY 88b, BEGIN 88, VEILLET 88). Le but de ces essais était de confirmer sur un segment les résultats obtenus sur couples lors de la recette en vol : l'influence du B/H sur la précision altimétrique et la précision géométrique de triangulation Spot.

Images Spot

Il s'agit du triplet stéréoscopique A du polygone ADEF (Marseille-Grenoble)

Equipement terrain

Les points correspondants du polygone ADEF, soit 120 environ.

Mesures

Chaque point a été observé sur chacun des trois couples stéréoscopiques constitués à partir des trois visées.

Calculs

Le calcul global des 3 segments avec tous les points en appui sert de référence. Les 3 couples de segments de rapport B/H respectifs 1.0, 0.6 et 0.3 ont été calculés indépendamment, chacun avec tous les points-terrain en appui.

Ecarts au terrain aux points d'appui

B/H	1.0	0.6	0.3	réf.
XY	7.2	8.4	9.2	7.6
Z	3.7	5.3	7.1	4.5
nbre pts	101	100	87	119

Ecarts moyens quadratiques en mètres

1.0
7.8
4.1
39

Calcul canadien
(3 scènes Sud)

Résultats principaux :

1. Ces chiffres montrent une légère dégradation planimétrique, et une dégradation de 7 à 4 m quand le B/H varie de 1. à 0.3. Ceci confirme les essais effectués sur couples de scènes, et étend au couples de segments leurs résultats.

2. Le calcul canadien, utilisant une autre modélisation de la prise de vues Spot, aboutit aux mêmes résultats.

3. Le calcul du triplet (réf.) fournit des résultats moins bons notamment en altitude que le couple de $B/H = 1.$; ceci s'explique par de médiocres mesures sur le couple de $B/H=3$, car l'identification des points, choisis sur le couple de $B/H = 1.$, fut difficile.

Annexe 3 les essais OEEPE

Présentation

Ce jeu de données a été constitué par l'IGN pour les essais, organisés par l'Organisation Européenne d'Etudes de Photogrammétrie Expérimentale, portant sur la Triangulation Spot. L'IGN y a également participé.

L'objectif de ces essais (Cf OEEPE 1991) était, outre l'encouragement au développement de ce type de savoir-faire, la comparaison des méthodes des uns et des autres sur des données communes. Dans un premier temps, chacun a fait ses propres observations des points-terrain, et procédé aux calculs proposés. Dans un second temps, un même jeu de mesure a été fourni à chacun des centres afin de mieux évaluer les performances des différents algorithmes utilisés.

Nous avons complété les essais proposés, dans le but de conclure sur l'équipement minimal d'un couple de segments ne dégradant pas de manière significative la précision..

Images Spot

1 -> les deux bandes Est du polygone ADEF (50 et 49).

2 -> la bande Est du polygone ADEF (50) : Marseille-Grenoble

Equipement terrain

Les points du polygone ADEF correspondants.

Mesures

1 -> celles faites pour l'ADEF sur Traster (donc en stéréoscopie)

2 -> des mesures sur images numériques en monoscopie simultanée : les points ayant été sélectionnés en stéréo, le pointé monoscopique a été extrêmement délicat, ce qui explique des résultats moins bons qu'avec les mesures stéréoscopiques sur Traster.

Calculs

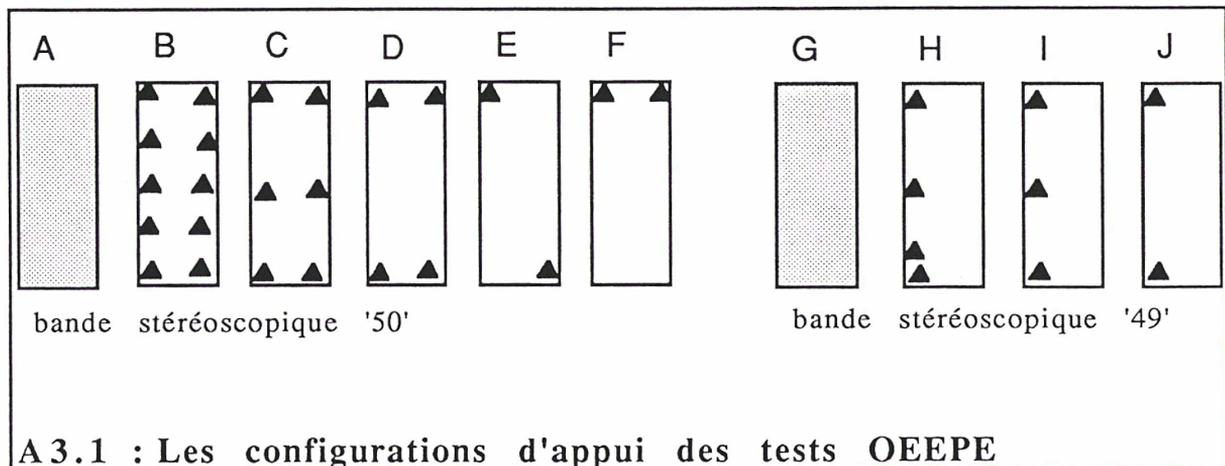
Nous présenterons d'abord les calculs proposés, dans le cadre des essais OEEPE, puis nous résumerons les calculs complémentaires que nous avons effectués.

Conclusion

Les calculs proposés et les essais complémentaires montrent que **l'équipement d'une bande ne nécessite que 3 points d'appui** : deux répartis sur les bords Est et Ouest et le troisième à plus de deux scènes N-S.

Résultats des essais proposés

Dix configurations différentes, 6 sur la bande 50 et 4 sur la bande 49, ont été proposées. Elles sont schématisées sur ci-dessous (A3.1)



A3.1 : Les configurations d'appui des tests OEEPE

Les résultats des six participants sont donnés en détail dans le tableau A3.4, deux graphiques les visualisent l'un pour la partie planimétrie A3.2, l'autre pour la partie altimétrie A3.3.

Les six modélisations comparées, sont répertoriées de la façon suivante:

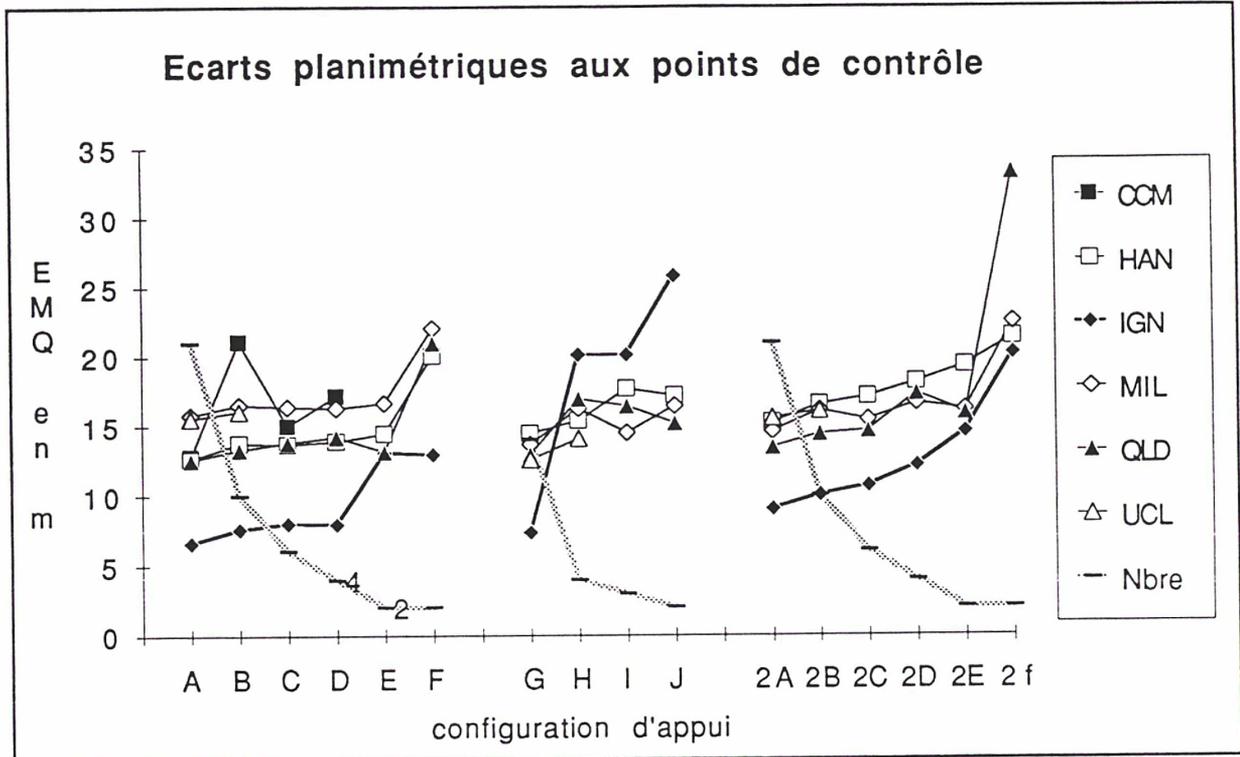
CCM	:	Canadian Center of Mapping	-> modélisation	Kratky
HAN	:	Hannover university	-> modélisation	Pitch
IGN	:	modélisation présentée dans cette étude		
MIL	:	Politecnico di Milano	-> modélisation	Haan
QLD	:	Queensland Dept of Lands	-> modélisation	Priebbenow
UCL	:	University College London	-> modélisation	Gugan

Nbre = nombre de points d'appui

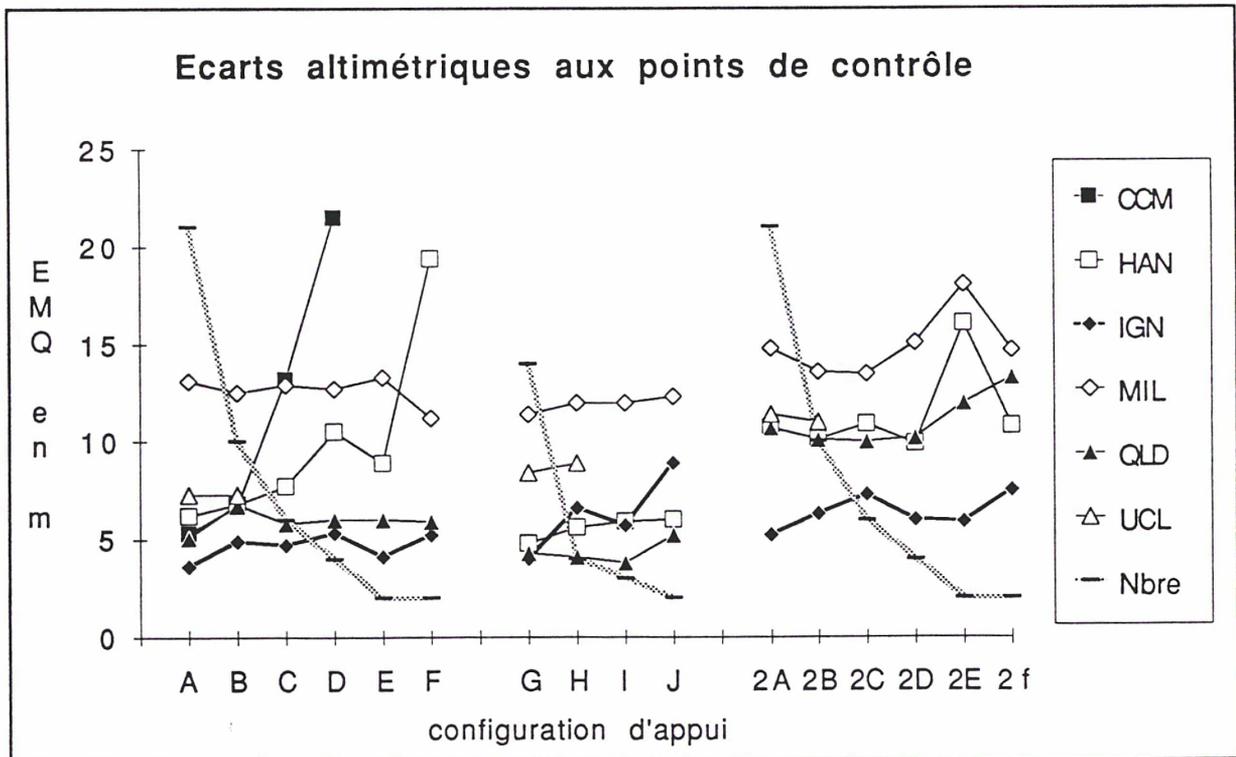
moy = moyenne, par configuration d'appui des EMQ de chaque participant

Les principales conclusions de ces essais sont les suivantes :

1. les résultats divergent plus en altimétrie qu'en planimétrie.
2. pour la seconde série (2A,2B,2C,2D,2E,2F), les résultats plus groupés soulignent l'importance de la qualité des mesures
3. 2 points ne suffisent pas toujours à appuyer un couple de segments (CCM),
4. 4 points aux quatre coins conviennent parfaitement pour une bande
5. il vaut mieux éviter de concentrer les appuis sur un bord (G,H,I,J)
6. nos résultats restent en deçà de la moyenne.



A 3.2 : Graphique des écarts PLANI - tests OEEPE



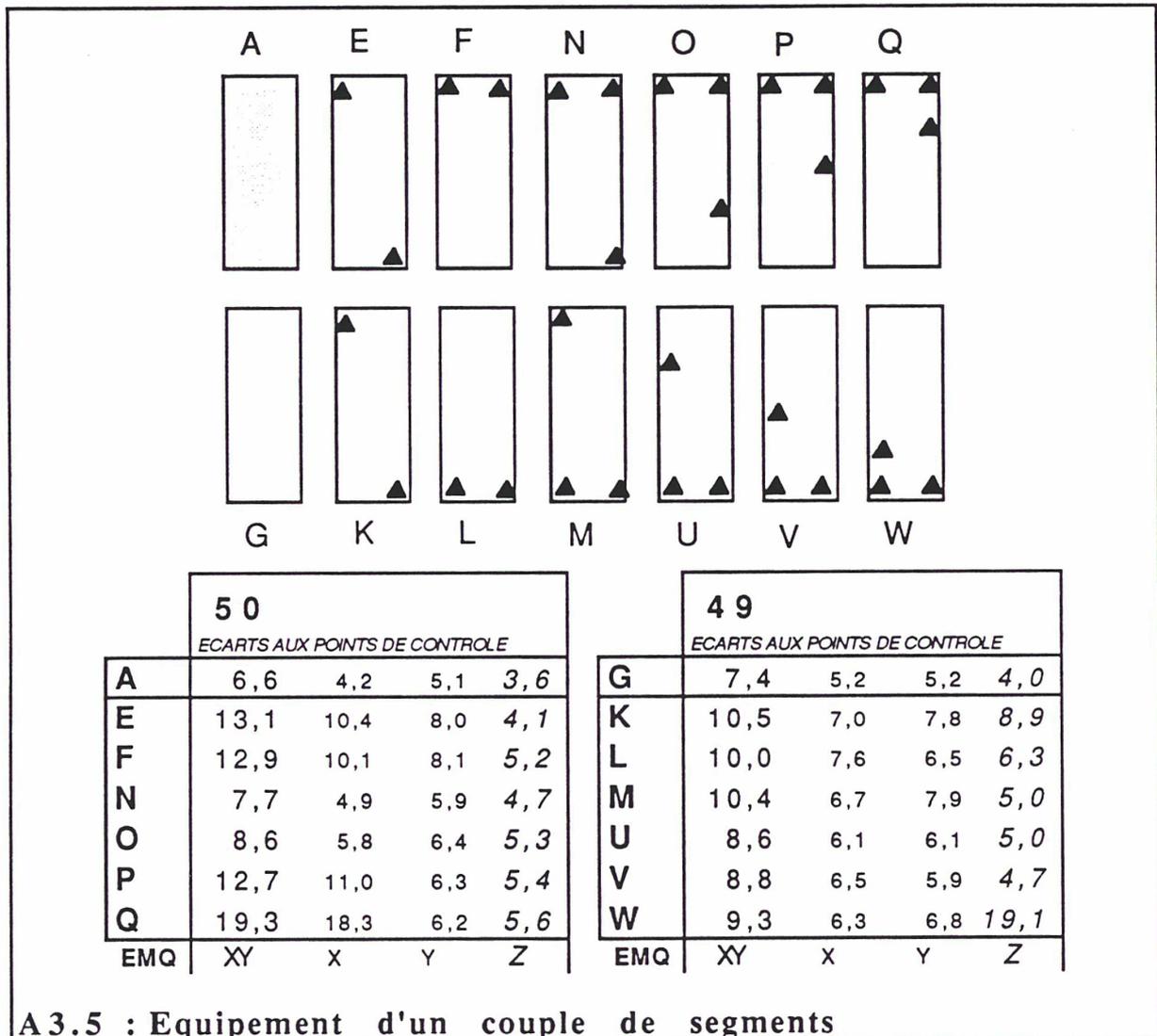
A 3.3 : Graphique des écarts ALTI - tests OEEPE

	CCM	HAN	IGN	MIL	QLD	UCL	Nbre appuis
A	12,8 5,3	12,7 9,1 8,8 6,2	6,6 4,2 5,1 3,6	15,8 11,7 10,6 13,1	12,6 9,7 8,0 5,1	15,6 7,3	21
B	21,1 6,7	13,8 9,2 10,3 6,8	7,6 4,5 6,1 4,9	16,5 11,9 11,5 12,5	13,3 10,4 8,3 6,8	16,1 7,3	10
C	15,0 13,2	13,7 8,8 10,5 7,7	8,0 5,5 5,8 4,7	16,4 12,2 11,0 12,9	13,8 10,6 8,9 5,8		6
D	17,2 21,5	13,9 8,7 10,9 10,5	7,9 5,4 5,8 5,3	16,3 12,2 10,8 12,7	14,2 11,1 8,9 6,0		4
E		14,5 8,8 11,5 8,9	13,1 10,4 8,0 4,1	16,7 12,1 11,5 13,3	13,2 10,4 8,1 6,0		2
F		20,1 13,0 15,3 19,4	12,9 10,1 8,1 5,2	22,1 15,5 15,7 11,2	21,0 17,0 12,3 5,9		2
G		14,5 8,8 11,5 4,8	7,4 5,2 5,2 4,0	13,7 10,3 9,0 11,4	12,9 8,9 9,4 4,3	12,6 8,4	14
H		15,4 8,7 12,7 5,6	20,1 15,3 13,1 6,6	16,3 13,9 8,5 12,0	17,0 11,6 12,4 4,1	14,1 8,9	4
I		17,7 8,7 15,4 5,9	20,1 15,3 13,1 5,7	14,5 11,9 8,3 12,0	16,4 10,3 12,8 3,8		3
J		17,2 8,9 14,7 6,0	25,8 20,2 16,1 8,9	16,4 14,2 8,3 12,3	15,2 10,4 11,1 5,2		2
2A		15,3 11,0 10,6 10,7	9,0 6,6 6,1 5,2	14,6 11,1 9,5 14,8	13,5 10,1 8,9 10,7	15,6 11,4	21
2B		16,6 12,8 10,5 10,1	10,0 7,5 6,6 6,3	16,1 13,2 9,3 13,6	14,4 11,5 8,7 10,1	16,1 11,0	10
2C		17,1 13,8 10,1 10,9	10,6 8,5 6,4 7,3	15,4 12,4 9,2 13,5	14,7 11,8 8,7 10,0		6
2D		18,1 14,8 10,5 9,9	12,1 10,1 6,7 6,0	16,6 13,8 9,3 15,1	17,3 13,6 10,7 10,2		4
2E		19,3 12,9 14,4 16,1	14,5 11,5 8,9 5,9	16,2 12,2 10,6 18,1	15,9 12,0 10,5 12,0		2
2f		21,4 18,1 11,4 10,8	20,2 18,6 7,9 7,5	22,5 19,7 10,8 14,7	33,2 29,6 15,1 13,3		2
EMQ	XY Z	XY X Y Z	XY X Y Z	XY X Y Z	XY X Y Z	XY Z	

A3.4 : Ecart au points de contrôle - tests OEEPE

Résultats des essais complémentaires

Des configurations identiques ont été testées sur les deux bandes 49 et 50. Il est certain que la qualité des points est très importante dans ce genre de calcul (en particulier celle du 3° point). Les calculs avec 2 points d'appui (E,F,K,L) ont été effectués sans inconnue de vitesse.



1. K et L confirment les résultats de E et F, à savoir que l'exactitude avec deux points est dégradée pour atteindre moins de 15 m en planimétrie et moins de 10 m en altimétrie.

2. Avec trois points, garder une bonne qualité, c'est placer la limite au calcul P ou V, c'est donc avoir le troisième point à plus d'une scène des deux autres. Si Q et W semblent moins bons que F et L, c'est que le calcul comporte les inconnues de vitesse.

Annexe 4	les essais KETIR
-----------------	-------------------------

Présentation

Ce chantier a été acquis en vue de démontrer les possibilités de l'imagerie Spot, en matière de cartographie topographique au 1:200000 en zone désertique. Cette démonstration s'est appuyé sur un chantier réel de 4 feuilles contigues (approximativement 120 km x 120 km).

Ces données (images, mesures des points d'appui et coordonnées de ceux-ci) ont été ultérieurement utilisées pour évaluer l'apport d'un calcul de bloc à ce type de projet.

Outre les essais visant à confirmer sur un segment une modélisation Spot (Cf AL BATTAH 89), les données de ce chantier ont été utilisées pour illustrer ce que peut apporter une compensation globale, en matière d'allègement de l'équipement terrain nécessaire (Cf VEILLET 90b).

Images Spot

Ce bloc est composé de 4 segments de 3 scènes de long (2 bandes stéréoscopiques) d'images panchromatiques de niveau 1A, couvrant au total 180 km x 140 km.

57-308, 57-307, 57-306 du 26.01.88 58-308, 58-307, 58-306 du 26.01.88 visée Est
57-308, 57-307, 57-306 du 27.01.88 58-308, 58-307, 58-306 du 12.02.88 visée Ouest

Les deux segments en visée Est ont été acquis le même jour (26.01.88) et forment un bisegment.

Equipement terrain

Il a été réalisé sur le terrain par méthodes topométriques traditionnelles de polygonaion. Les points sont disposés sur le pourtour des feuilles 1:200000 à cartographier (Cf A4.1).

Mesures

Elles ont été effectuées sur films sur Traster : 184 points, 432 mesures

EMQ mesures = $1/3$ pixel ($4.3 \cdot 10^{-6}$)

Modélisation utilisée m2

une inconnue d'éloignement (linéaire en temps)

trois inconnues d'attitude

une inconnue de focale par HRV utilisé

trois angles de biais inter HRV pour le bisegment

Résultats

L'objectif poursuivi était de proposer pour ce bloc une configuration d'appui allégée, qui garde une exactitude peu dégradée par rapport à celle d'un calcul avec l'équipement complet. Ceci a conduit à une configuration sur 4 coins du bloc et sur l'interbande (Cf A4.2).

KE3_REF calcul de référence

Écarts terrain		A P P U I			C O N T R O L E		
en mètres		X	Y	Z	X	Y	Z
nbre de points		82			107		
écart moyen		0,0	0,0	-0,2			
écart min		-12,2	-10,0	-8,5			
écart max		10,3	10,8	13,7			
E M Q		5,2	3,4	4,0			
écart type							

Cf A4.1 : graphique des écarts au terrain aux points d'appui de ce bloc

KE3_I appuis aux 4 coins (4 pts) et sur l'interbande (3 pts)

Écarts terrain		A P P U I			C O N T R O L E		
en mètres		X	Y	Z	X	Y	Z
nbre de points		7			75		
écart moyen		-0,1	-0,2	-1,0	-0,5	-0,8	-0,3
écart min		-13,5	-5,6	-8,3	-15,5	-13,3	-12,6
écart max		7,1	4,1	7,9	13,1	9,8	14,0
E M Q		7,0	3,0	5,1	6,4	4,2	5,0
écart type					6,4	4,2	5,0

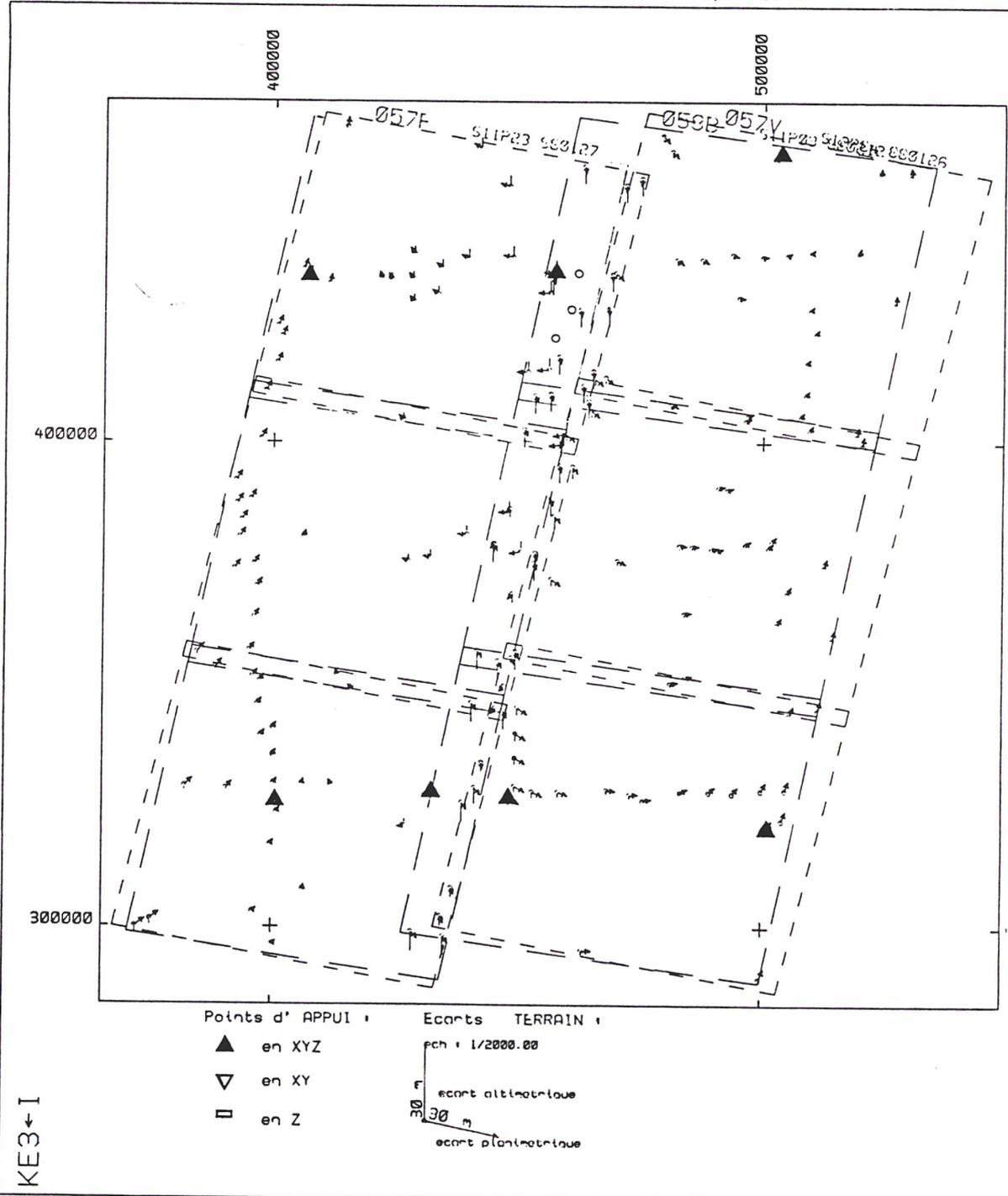
Cf A4.2 : graphique des écarts au terrain aux points d'appui de ce bloc

A 4.2 : Bloc KETIR . configuration allégée

graphique des écarts au calcul de référence

KETIR

Ecarts au calcul de référence



Annexe 5	le bloc DJIBOUTI
-----------------	-------------------------

Présentation

Il s'agit du premier chantier de spatiocartographie réel, utilisant la spatiotriangulation d'images Spot. Ce bloc a été acquis pour un chantier de production pas pour faire des tests (Cf VEILLET 89b, 89c).

Il est cependant intéressant à plusieurs titres :

- . c'est un bloc acquis dans un délai de temps relativement court (mars à octobre 88).
- . son équipement principal d'appui a été effectué par stéréopréparation de terrain
- . il dispose d'un équipement complémentaire altimétrique dense issu de la géodésie existante
- . c'est le premier bloc autre que l'ADEF, ayant permis de confirmer les résultats initiaux
- . pour ce bloc, des points spécifiques de liaison ont été préparés

Son inconvénient majeur, du point de vue de l'évaluation de la triangulation Spot, c'est qu'il n'y a pas de points connus sur les bords.

Images Spot

32 images ont été acquises, 31 sont utilisées dans la compensation. Elles forment 10 segments dont 5 bissegments.

Équipement terrain

L'équipement a été réalisé par stéréopréparation terrain. Les points ont été déterminés par méthode GPS, avec des récepteurs de navigation utilisés en différentiel. Leur précision de détermination est de 5 m en écart-type.

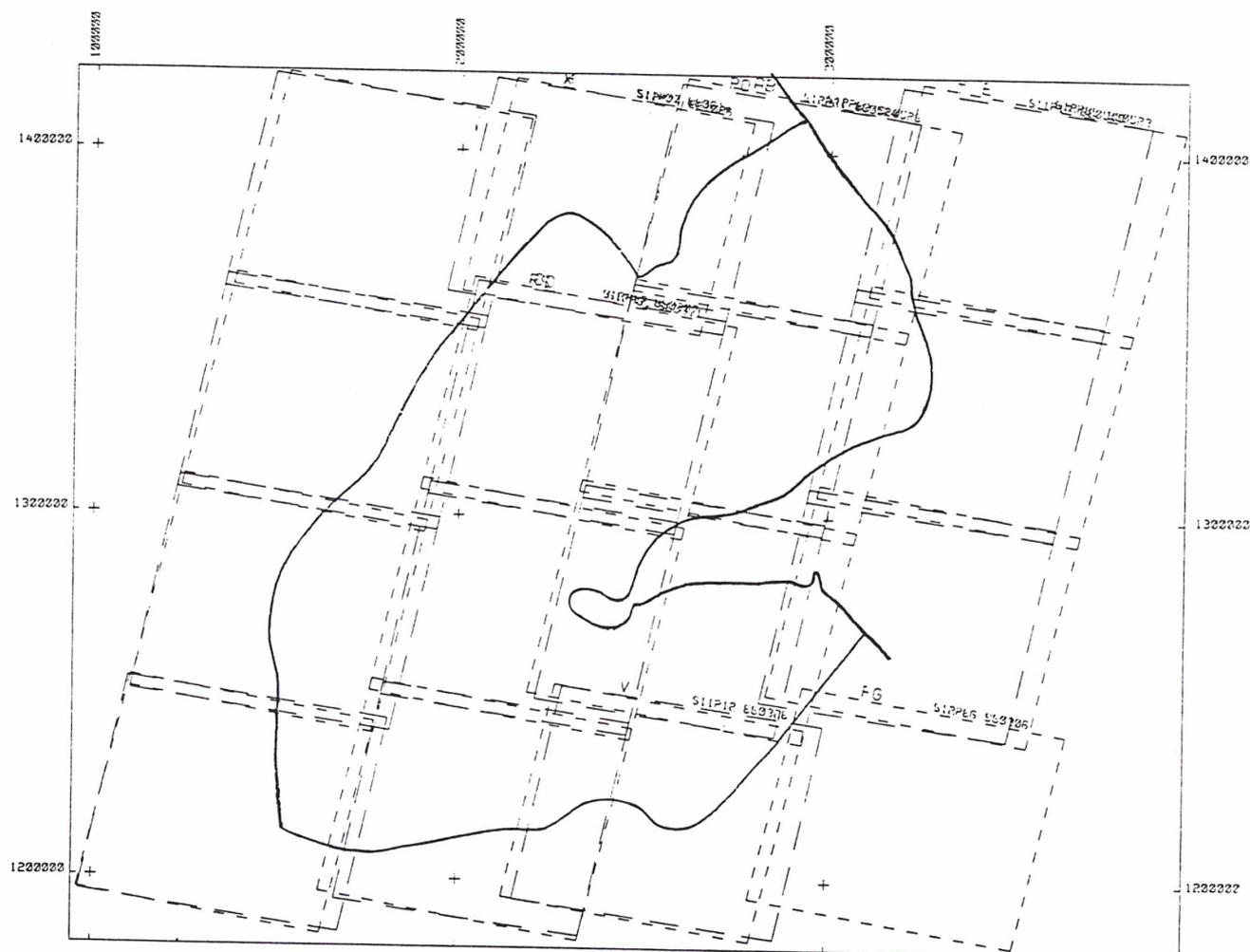
Les types de points choisis sont ici en majorité des taches rondes (et non des carrefours comme en France !)

Ces points sont répartis sur tout le chantier (territoire de Djibouti), mais pas sur toute la surface couverte par les images.

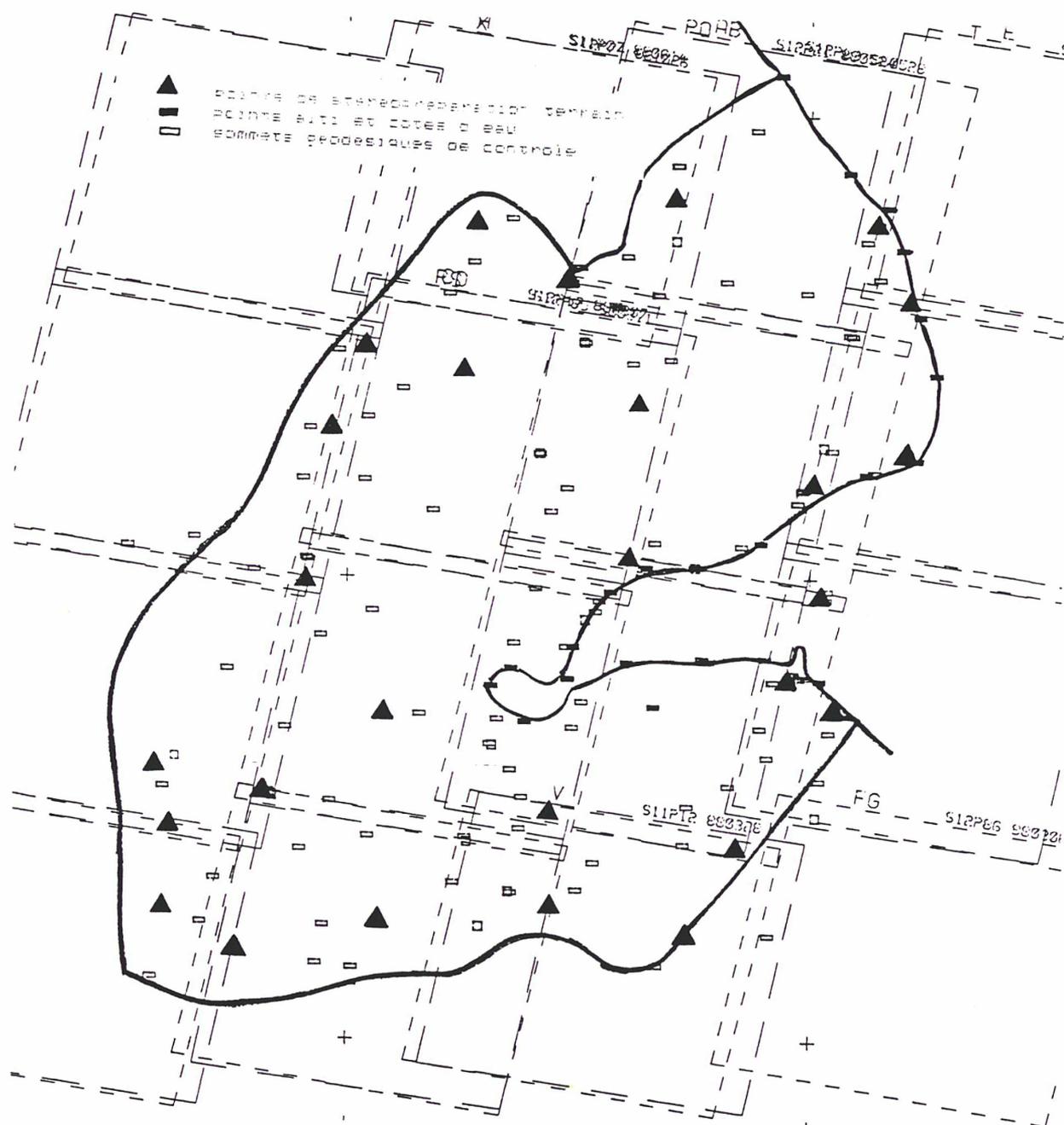
Liaisons

Des points de liaison ont été préparés, "à l'aiguille", i.e. choisis puis définis à l'aide d'un croquis et "piqués" sur les tirages papier des clichés issus des données Spot. Ces points ne permettent pas d'assurer un bon lien entre les paramètres F

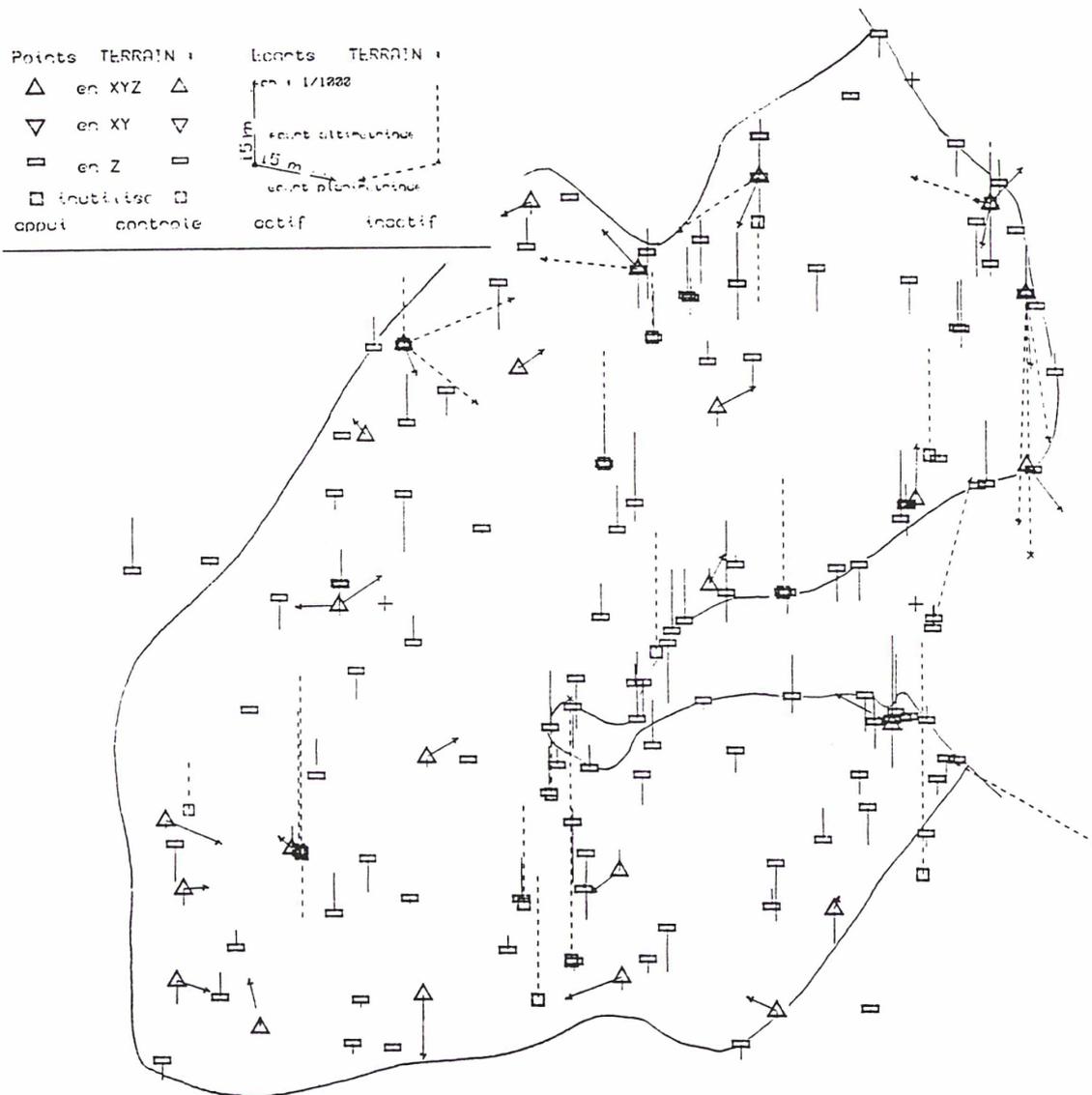
A5.1 : DJIBOUTI : localisation des scènes



A5.2 : DJIBOUTI : équipement terrain



A5.3 : DJIBOUTI : graphique des écarts terrain



A 5.4 : DJIBOUTI .calculs avec 6 appuis alti et/ou plani

DJIBOUTI	ECARTS AUX POINTS D' A P P U I			
nbre de points	6			
écart moyen	0,4	-0,3	0,0	
écart min	-7,9	-9,7	-1,5	
écart max	7,8	6,9	1,2	
E M Q	7,4	5,1	5,4	0,9

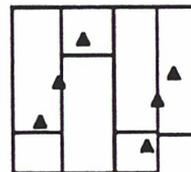
XY X Y Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE C O N T R O L E			
23		183	
	2,5	0,5	0,7
	-10,9	-13,9	-14,1
	14,2	9,2	17,9
9,4	7,1	6,2	6,0

XY X Y Z

9,1 6,6 6,2 6,0



DJIBOUTI	ECARTS AUX POINTS D' A P P U I			
nbre de points	0			
écart moyen	-0,1			
E M Q	0,7			

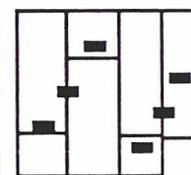
XY X Y Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE C O N T R O L E			
24		184	
	51,5	-215,4	1,4
221,8	52,8	215,4	6,2

XY X Y Z

13,1 11,6 6,0 6,1



DJIBOUTI	ECARTS AUX POINTS D' A P P U I			
nbre de points	2			
écart moyen	0,4	-0,4	-0,2	
écart min	-1,7	-1,7	-2,7	
écart max	2,6	0,9	1,1	
E M Q	2,6	2,2	1,4	1,3

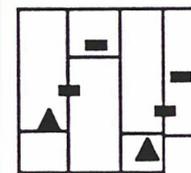
XY X Y Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE C O N T R O L E			
24		184	
	-3,3	-3,1	1,5
	-15,5	-17,4	-12,8
	6,9	5,6	20,5
10,2	7,6	6,8	6,4

XY X Y Z

9,2 6,9 6,1 6,2



DJIBOUTI	ECARTS AUX POINTS D' A P P U I			
nbre de points	6			
écart moyen	0,4	-0,3		
E M Q	7,1	4,9	5,2	

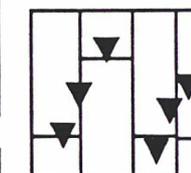
XY X Y Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE C O N T R O L E			
24		183	
	1,8	0,5	480,2
9,6	7,4	6,1	480,3

XY X Y Z

9,4 7,2 6,1 7,2



DJIBOUTI	ECARTS AUX POINTS D' A P P U I			
nbre de points	6			
écart moyen	0,5	-0,3	0,3	
écart min	-7,8	-9,5	-0,2	
écart max	7,7	6,8	0,8	
E M Q	7,4	5,1	5,4	0,6

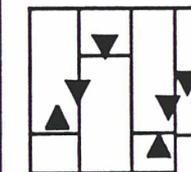
XY X Y Z

ECT

ECARTS AUX POINTS DE C O N T R O L E			
24		183	
	2,0	0,6	0,4
	-11,2	-13,8	-15,0
	14,1	9,3	15,4
9,5	7,3	6,1	6,4

XY X Y Z

9,3 7,0 6,1 6,4

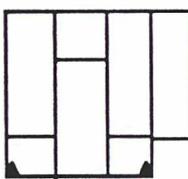


Essai avec points d'appui uniquement sur le bord Sud du bloc.

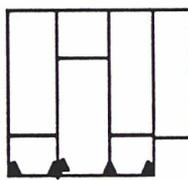
Pour cet essai, les points d'appui sont des points 'de spatío', affectés des coordonnées calculées dans le bloc de référence, avec tous les points en appui.

Les résultats de ces calculs effectués avec la modélisation γ , sont les suivants :

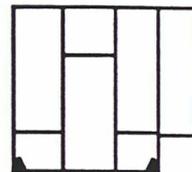
DJIBOUTI		ECARTS AUX POINTS D' A P P U I				ECARTS AUX POINTS DE C O N T R O L E							
nbre de points	2				2				32	192			
écart moyen		0,1	-0,5	0,2		-6,4	-1,8	-0,1					
écart min		-0,9	-0,9	-0,5		-19,8	-14,3	-15,0					
écart max		1,2	0,0	0,8		12,3	8,7	18,2					
E M Q	1, 2	1,0	0,6	0, 7		12, 0	10,3	6,1	6, 1				
		XY	X	Y	Z	XY	X	Y	Z				
ECT						10, 0							



DJIBOUTI		ECARTS AUX POINTS D' A P P U I				ECARTS AUX POINTS DE C O N T R O L E							
nbre de points	5				5				32	192			
écart moyen		0,1	-0,2	0,0		0,9	-0,4	-1,0					
écart min		-2,0	-0,5	-0,5		-10,8	-13,5	-16,1					
écart max		3,0	0,6	0,4		14,9	9,6	17,8					
E M Q	1, 6	1,6	0,4	0, 4		8, 9	6,7	5,8	6, 2				
		XY	X	Y	Z	XY	X	Y	Z				
ECT						8, 9							

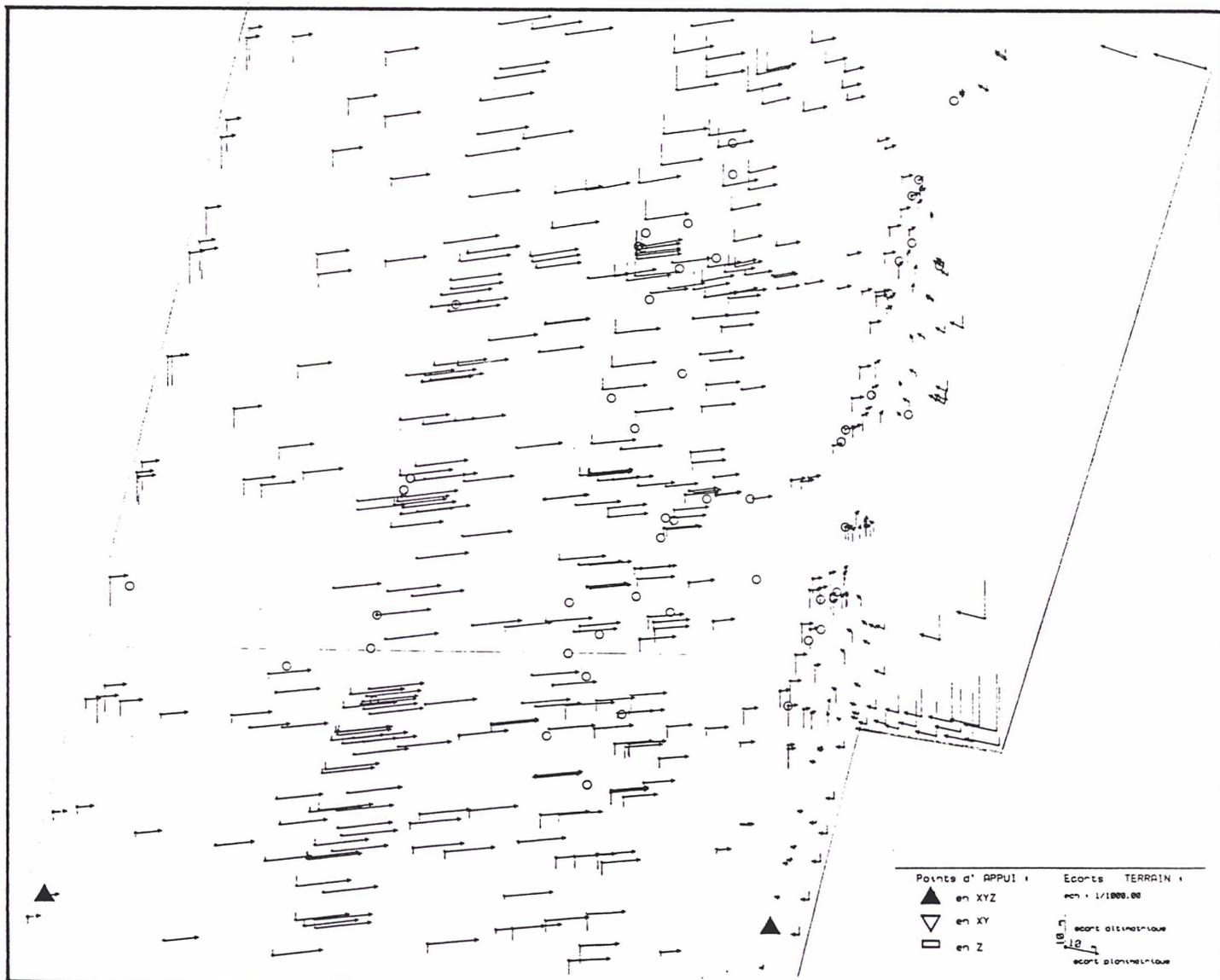


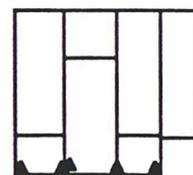
1. On note une dégradation de ECT en X, outre un écart moyen fort.
2. Pour évaluer la déformation du bloc, ces deux calculs ont été comparés au calcul de référence effectué avec tous les points en appui. Ces comparaisons sont présentées sous forme de graphiques : A5.5 et A5.6. Leur examen conduit immédiatement à écarter la première configuration et à retenir la seconde.
3. Ces deux calculs et leur comparaison posent la question des liaisons latérales, devant lier les paramètres F des deux bandes adjacentes.



A5.5 : DJIBOUTI : appuis aux deux coins Sud

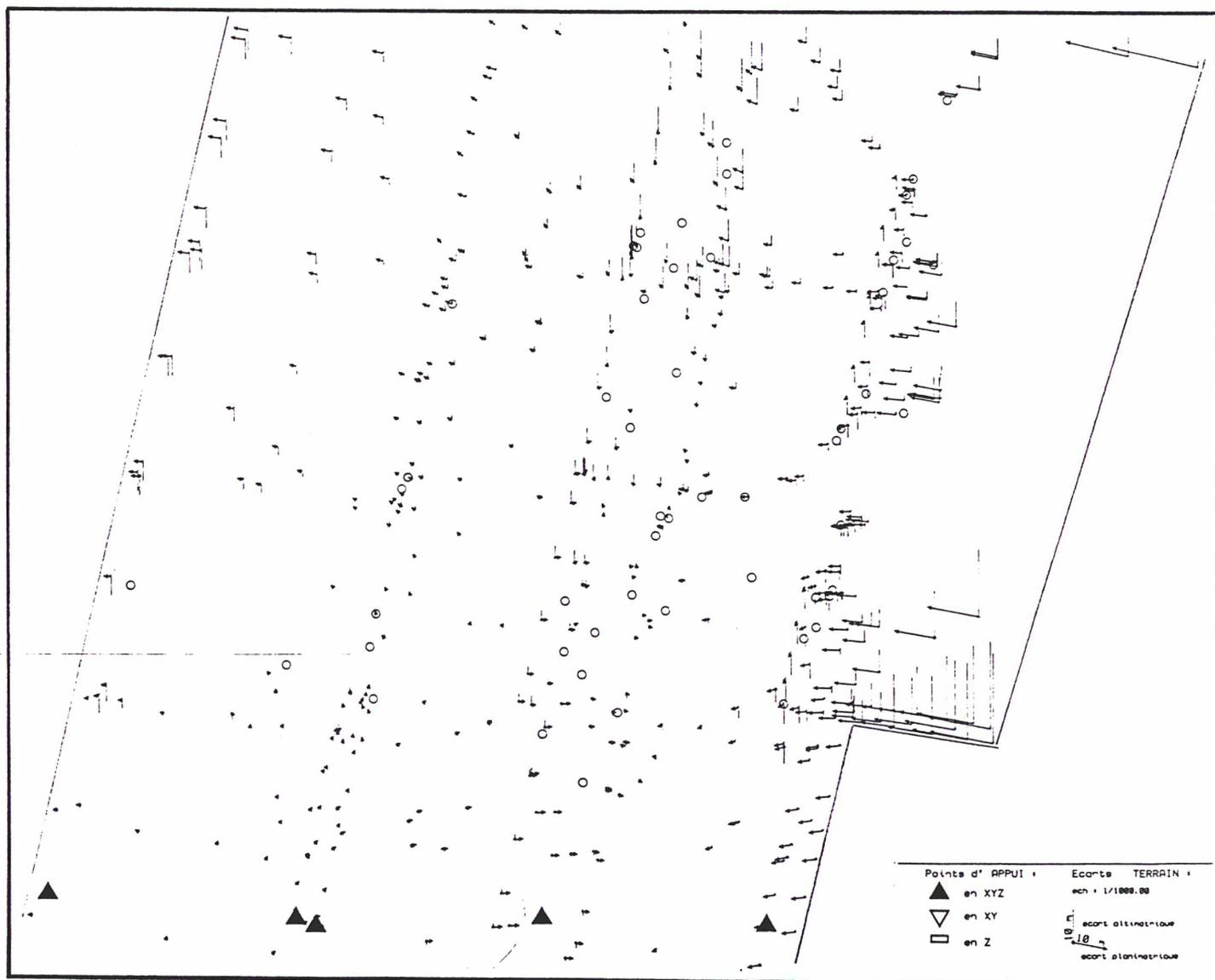
Le graphique donne les écarts au calcul de référence, pour ne pas surcharger les limites de scènes n'ont pas été reportées





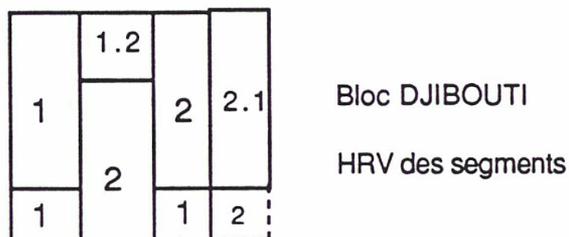
A5.6 : DJIBOUTI : appuis répartis au Sud

Le graphique donne les écarts au calcul de référence, pour ne pas surcharger les limites de scènes n'ont pas été reportées



La comparaison des deux graphiques montre surtout, qu'en l'absence d'une liaison latérale non ponctuelle, le paramètre F, doit être fixé par des points au sol.

En complément, voici les HRV en service pour les scènes de ce bloc,



qui n'expliquent pas les déplacements en X constaté sur A5.4.

Annexe 6	le bloc IRAN
-----------------	---------------------

Présentation

Bloc acquis et calculé pour un travail de production.

Il est constitué d'images multispectrales, et a permis de fournir des résidus réels de mesure pour des images de ce type, en confirmant les prévisions.

Images Spot

Images XS, acquises durant l'été 90.

38 scènes en 8 segments, longs de 2 à 6 scènes

Equipement terrain

Points de cartes, sans homogénéité sur l'ensemble de la zone (ni même projection, ni même référence, sans données précises de passage d'un système à l'autre). Aucun contrôle terrain n'est possible.

Mesures

435 points, 1284 mesures, effectuées sur films stéréo sur Traster

EMQ mesures :

en x : 3.3 en y : 6.7 en xy : 7.5 (en 10^{-6})

soit 1/3 pixel XS

Modélisation β

deux inconnues de position (éloignement et écart transversal à la trajectoire)

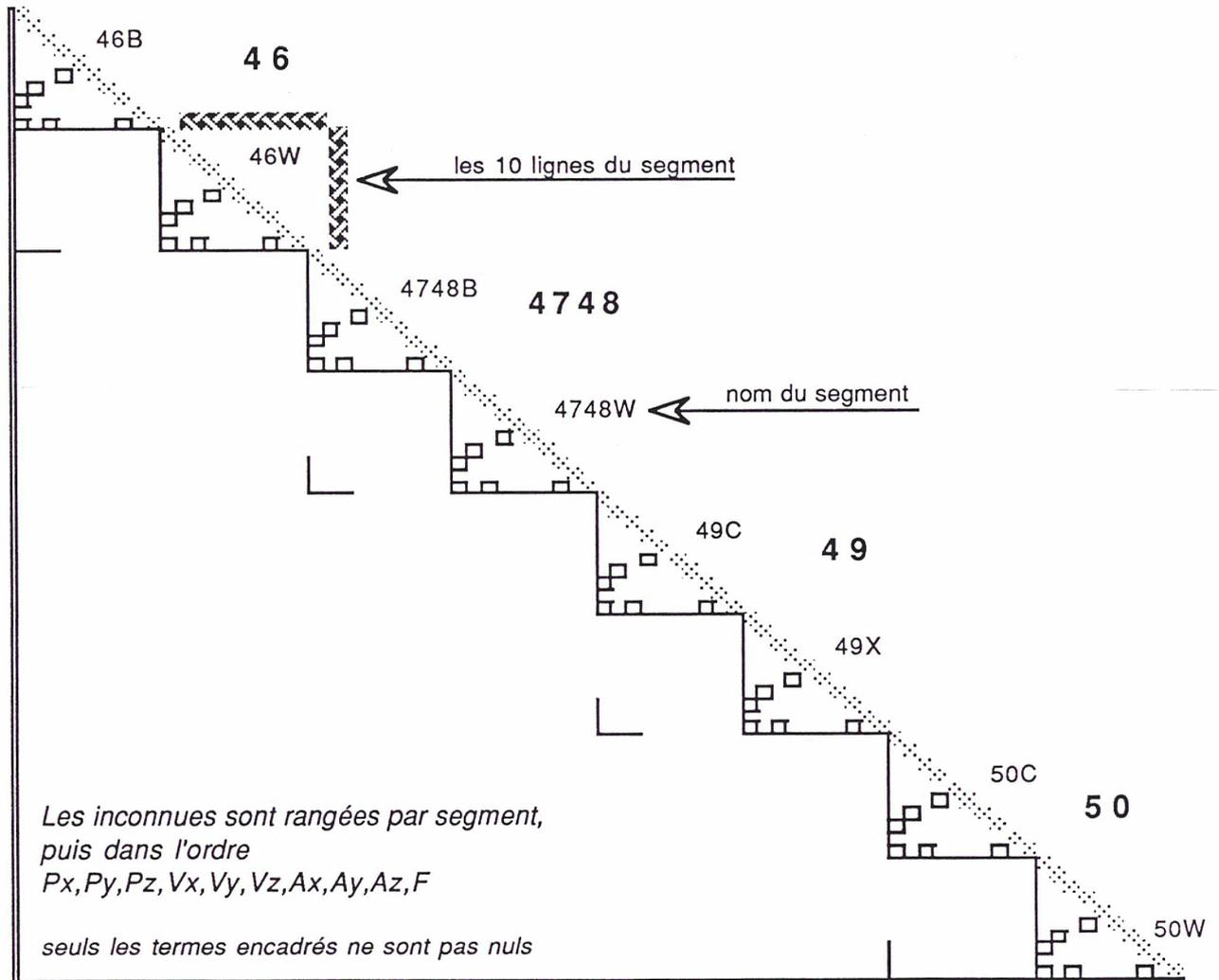
deux inconnues d'attitude (lacet et tangage)

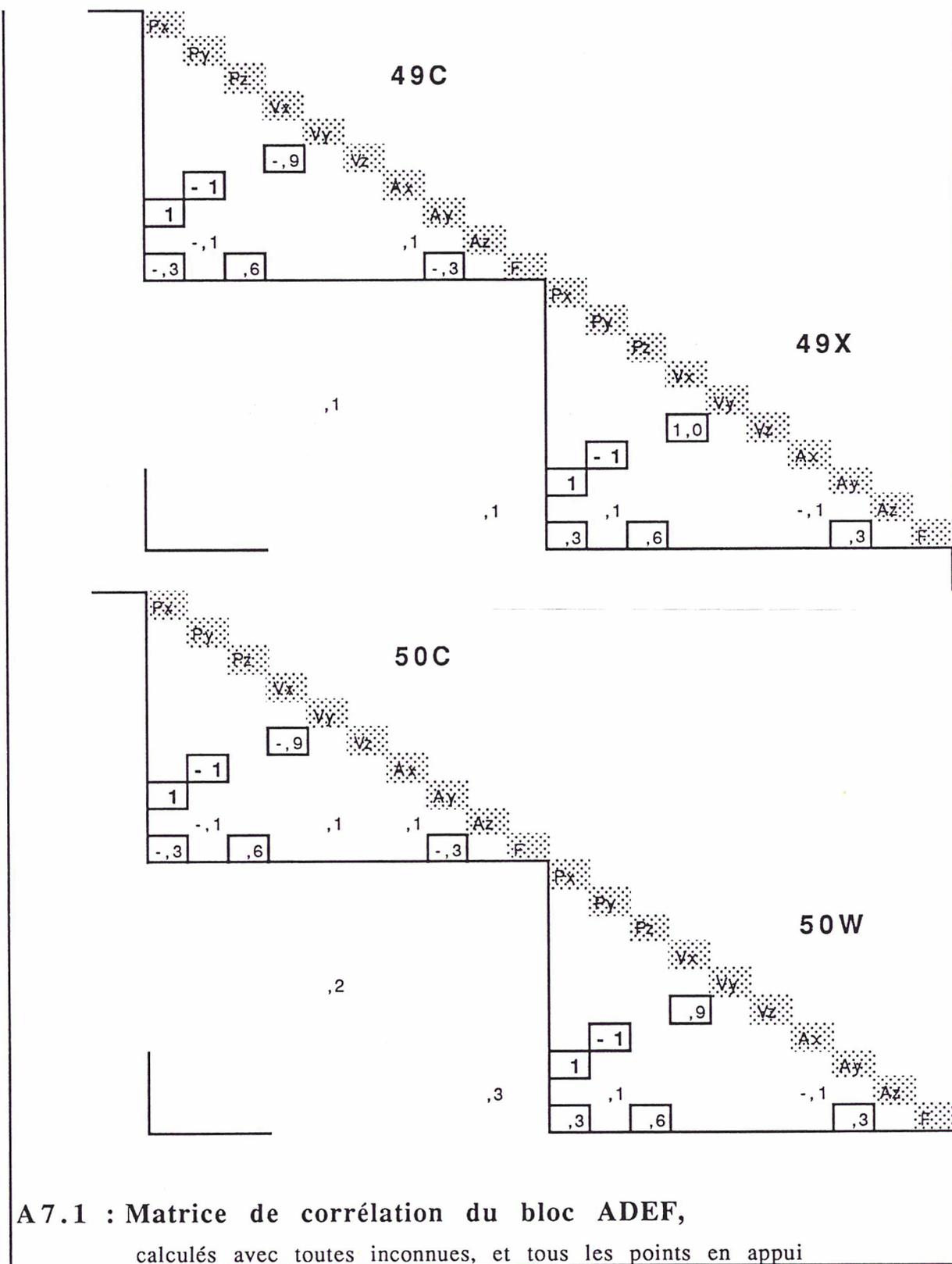
Annexe 7 Matrice de corrélation

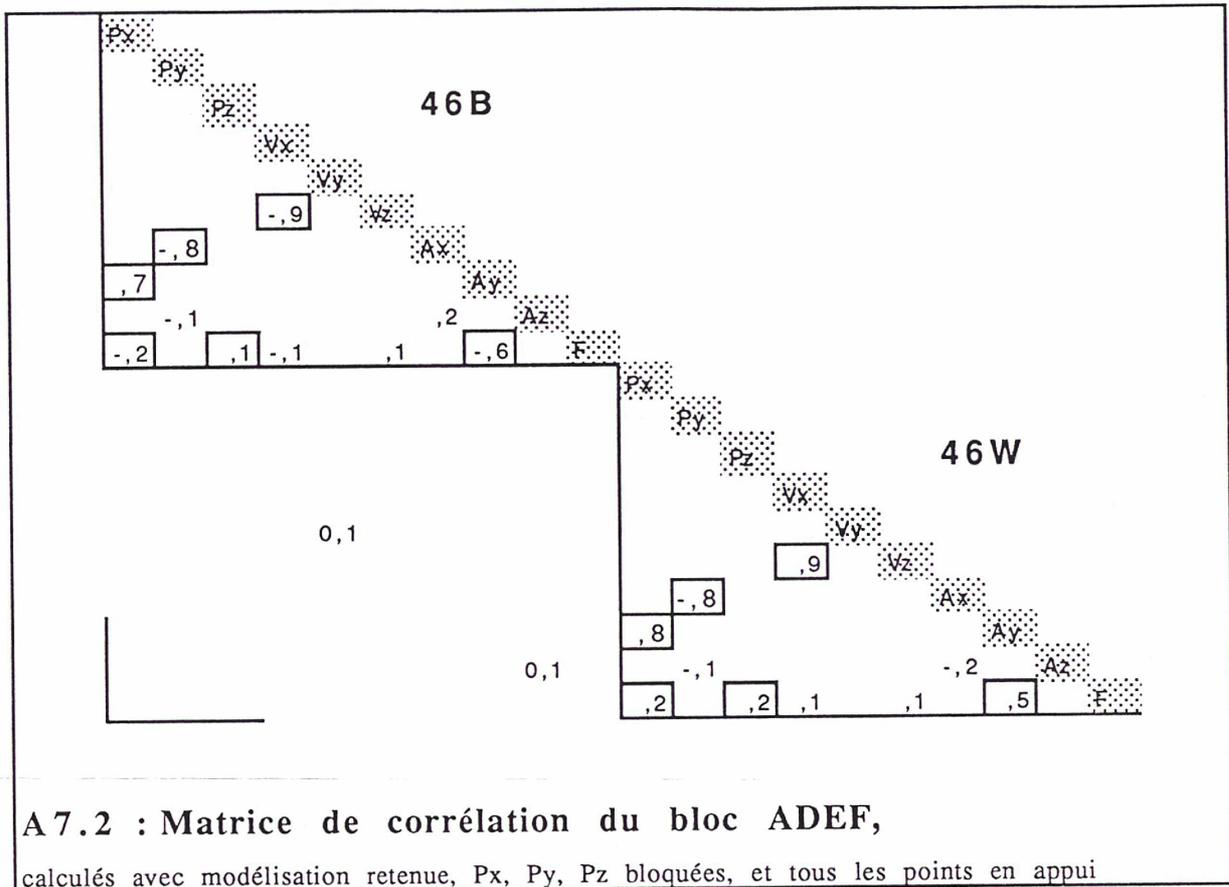
La matrice C est définie comme suit :

si N est l'inverse de la matrice normale $N=(A^T p A)^{-1}$,

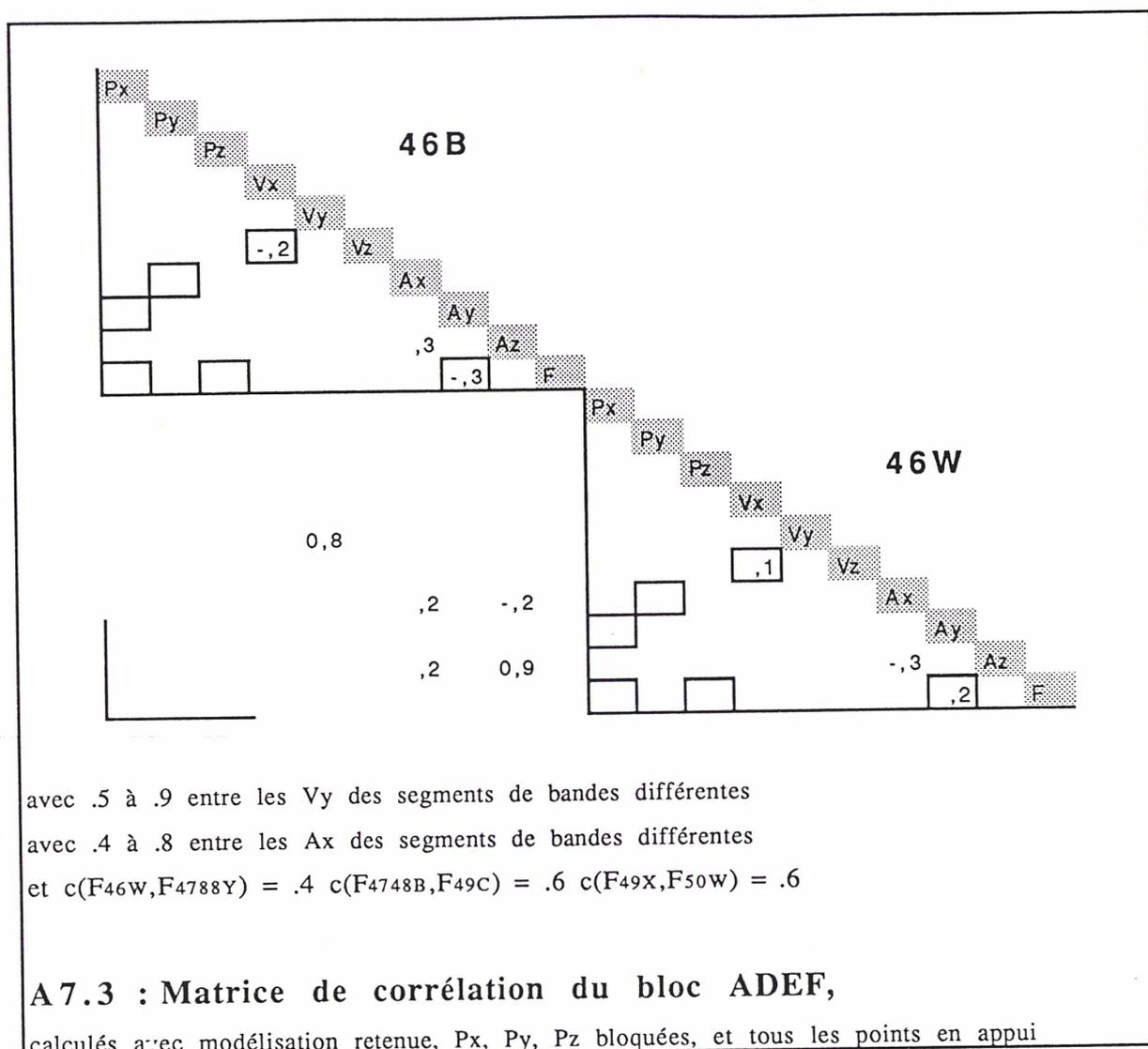
alors, pour $i \neq j$, $c_{ij} = \frac{n_{ij}^2}{n_{ii} \cdot n_{jj}}$ x (signe de n_{ij}), et $c_{ii} = n_{ii}$.







Une légère corrélation lie Px, Py, Vx, Vy et Ay à F, ce qui est dû au lien entre inconnues retenues et causes réelles.



segment	46B	46W	4748B	4748Y	49C	49X	50C	50W
HRV	1	2	1	2	1	1	1	2

2.

La modélisation retenue (B) donne la meilleure précision, ce qui laisse penser qu'elle déforme peu le bloc, puisqu'elle est la plus proche du terrain aux points-terrain.

3.

B1 < B : donc, même sans points d'appui, pour un bloc, il faut garder le degré 1 en P, i.e. garder les inconnues de vitesse.

4.

En regardant de plus près les différences entre les modélisations, on arrive à la conclusion qu'il vaut mieux avoir les inconnues les plus significatives, et ne garder qu'elles.

B2 > C : donc, mieux vaut garder F que Pz

AF > C et G > GP : donc, mieux ajouter F, même en gardant aussi Pz.

B > D : donc mieux vaut ne pas garder Pz, si on a F

B > G : mieux vaut ne pas garder d'inconnues corrélées

5.

Ce tableau peut être complété par le suivant (déjà présenté en 7.), évaluant les écarts $M_{RIEN} - M_{TOUT}$ en recherchant une rotation entre les deux blocs.

$$M_{RIEN} = T + R M_{TOUT}$$

puis en examinant les résidus de cette transformation.

Estimation de la translation rotation bloc RIEN -> bloc TOUT

	R : angles de rotation en microradians	Rx	Ry	Rz	Tx	Ty	Tz
	T : translation en mètres <i>rmq en mètres</i>	<i>rmqX</i>	<i>rmqY</i>	<i>rmqZ</i>			
B	Vx Vy Vz Ax Ay Az F	-109	-51	58	58,3	-358,2	464,1
		4,0	2,2	11,7			
C	Pz Vz Ax Ay Az	-169,0	-295,0	67,0	95,3	-365,5	456,1
		4,2	2,0	5,4			
D	Px Py Pz Az F	-125	-108	62	66,0	-371,7	440,5
		3,6	2,1	11,6			

bloc ADEF

Références bibliographiques et Bibliographie

- Actes du Symposium international sur les applications topographiques des données SPOT. Sherbrooke, Québec, 1988.
- AKUTSU A., TATEISHI R., 1990. *Evaluation of Spot data for relative DEM production without GCP*. International archive of Photogrammetry Vol28 t4. Commission IV. Proceedings of the Symposium on Cartographic and data base applications of photogrammetry and remote sensing. Tsukuba. pp 169-179.
- ALBATTAH M., 1989. *Modélisation géométrique et stéréorestitution photogrammétrique des images spatiales de type Spot*. Thèse de Doctorat. Paris.
- BAUDOIN A., 1980. *Intérêt des vues spatiales stéréoscopiques et à haute résolution pour la cartographie à moyenne échelle*. X^e conférence ACI. Bul. Inf. IGN 80/3.
- BEGIN D., 1988. *Expériences franco-canadiennes: précision géométrique des données Spot : résultats canadiens*. Actes du Symposium international sur les applications topographiques des données SPOT. Sherbrooke, Québec, Oct. 1988. pp 169-180.
- CHAVEZ P., SIDES P., ANDERSON J., 1991. *Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data : Landsat TM and Spot Panchromatic*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol57, n°3, Mar91, pp 295-303.
- CHEN L.C., YUAN J.K., 1987. *Geometric analysis for Spot stereopairs*. In : edited by M.F.Buchroithner & R. Kostka, Remote sensing: towards operational cartographic application. Willi Nordberg Symposium. Graz, Autriche. 7-9 Sept. 1987. pp 83-87.
- CHOROWICZ J., BREARD J.Y., GUILLANDE., MORASSE C.R., PRUDON D., RUDANT J.P., 1991. *Dip and Strike Measured Systematically on Digitized Three-Dimensional Geological Maps*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol57, n°4, Apr91, pp 431-436.
- CHOROWICZ J., KIM J., MANOUSSIS S., RUDANT J.P., FOIN P., VEILLET I., 1989. *A New Technique for Recognition of Geological and Geomorphological Patterns in Digital Terrain Models*. Remote sensing environment. n°29. pp 229-239 (1989).
- CNES, 1983. *Caractéristiques géométriques de la prise de vue Spot*. Note interne CNES S-NT-0-0091-CN du 04.01.1983. 23 p.
- CNES, SPOT Image, 1986. *Guide des Utilisateurs de Données Spot*.
- COMITAS, 1988. *Glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale*. Bul. SFPT. n°112 (1988-4).

- DENIS P., BAUDOIN A., 1988. *Applications topographiques de Spot à l'IGN-France*. International Archive of Photogrammetry. Proceedings of Kyoto congress. Comm. IV. pp 106-115.
- DENIS P., GUILLOUET G., 1988. *Restitution photogrammétrique de couples Spot : l'exemple Aix-Marseille*. Bul. Inf.IGN. n°56 (88/4).
- DOWMAN I.J., 1988. *Equipment for Map Production from Spot Data*. CERCO seminar on the SPOT system and its cartographic applications. Paris 6-9 juin 1988. pp 19-53.
- DUCHER G., DENIS P., 1989. *Les applications de la télédétection aux cartes topographiques et leurs aspects opérationnels*. Communication invitée à l'IGARSS'89.
- EGELS Y., 1987. *Quelques formules utiles en photogrammétrie analytique*. Eléments de support de cours. ENSG IGN.
- FOIN P., 1988. *Results of the preliminary evaluation programme for Spot : Spot data evaluation and use at IGN*. Photogrammetric record, 12(72). pp 781-785 (oct 1988)
- FONTAINE A., 1990. *Le poids des observations dans la méthode des moindres carrés*. Document interne. Décembre 1990. 77p.
- FRIEDMAN D., et al, 1983. *Multiple scene precision rectification of spaceborne imagery with very few ground control points*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol49, n°12, Dec83, pp 1657-1667.
- FUKUSHIMA Y., 1990. *Accuracy estimation of stereo satellite model orientation by error propagation*. Paper presented at the ISPRS comm. IV symposium on Cartographic and data base applications of photogrammetry and remote sensing. Tsukuba. May 1990. 7p.
- GIGORD P., 1986. *Spécificités du logiciel Solar destiné à l'utilisation d'images Spot sur Traster*. Document interne IGN.
- GIGORD P., 1991. *Support de cours de géométrie des images Spot*. IGN.
- GUGAN D., 1987. *Practical aspects of topographic mapping from Spot imagery*. Photogrammetric record. 12(69) pp 349-355 (april 87).
- GUGAN D., 1990. *Operational systems for mapping from Spot imagery*. Paper presented at the ISPRS comm. IV symposium on Cartographic and data base applications of photogrammetry and remote sensing. Tsukuba.
- GUGAN D.J., DOWMAN I.J., 1988a. *Accuracy and completeness of topographic mapping from Spot imagery*. Photogrammetric record. 12(72) pp 787-796.
- GUGAN D.J., DOWMAN I.J., 1988b. *Topographic mapping from Spot imagery*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol54, n°10, Oct88, pp 1409-1414.
- GUICHARD H., 1983. *Etude théorique de la précision dans l'exploitation cartographique d'un satellite à défilement. Application à Spot*. Bul. SFPT n° 90 (1983-2).

- GUICHARD H., PIKEROEN B., 1988. *La modélisation des images spatiales : une approche générale, simple et rigoureuse*. Actes du Symposium international sur les applications topographiques des données SPOT. Sherbrooke, Québec, 1988. pp 51-63.
- HAAN A., 1991. *Geometric aspects of Spot imagery*. Bollettino di geodesia e scienze affini. Anno L n°1. Mars 91. pp 1-10.
- HAITZMAN H., KREILING W., 1988. *Restitution of Spot images*. Presented paper to ISPRS Congress Kyoto 88. Comm. III.
- HARTLEY W. S., 1988. *Topographic mapping with Spot 1 data : a practical approach by the Ordnance Survey*. Photogrammetric record, 12(72). pp-833-846 (oct 1988)
- HOPKINS P., 1991. *Dynamic models for photogrammetric processing of Spot satellite imagery*. Technical papers 1991 ACSM-ASPRS Annual Convention. Vol5:172-181.
- HOTTIER P., 1986. *Cours d'analyse numérique*. ENSG IGN.
- HOTTIER P., ALBATTAH M., 1988. *Spot et quelques problèmes de photogrammétrie analytique*. ENSG IGN.
- HUANG S., ZHANG A., 1991. *An equivalent photography model for analytical processing of Spot images*. Technical papers 1991 ACSM-ASPRS Annual Convention. Vol5:201-207.
- INABA K., 1990. *Developpementnt of mapping method using Spot data*. Paper presented at the ISPRS comm. IV symposium on Cartographic and data base applications of photogrammetry and remote sensing. Tsukuba.
- JACOBSEN K., ENGEL H., LOHMAN P., PITCH G., 1988. *Aerial triangulation of Spot and aerial photography*. International Archive of Photogrammetry. proceedings of Kyoto congress. Comm. III. pp III.436-441.
- JALOUX A., 1989. *SPOT et la cartographie dans les pays en voie de développement*. Metropolis n°86 "Nouvelle cartographie".
- JULIEN P., 1990. *Détermination de la position du faisceau SPOT*. Document interne IGN Cogit. Nov 90. 17 p.
- KONECNY G., 1988. *Geometric Evaluation of Spot Imagery*. CERCO seminar on the SPOT system and its catographic applications. Paris 6-9 juin 1988. pp 19-53.
- KONECNY G., LOHMAN P., ENGEL H., KRUCK E., 1987. *Evaluation of Spot imagery on analytical photogrammetric instruments*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol53 n°9, Sep87, pp 1223-1230.
- KOPLIKU N., 1990. *Estimation sans biais des variances des différents groupes d'observations dans une compensation hétérogène*. Thèse de Doctorat. Paris.
- KRATKY V., 1988a. *Universal photogrammetric approach to geometric processing of Spot images*. International Archive of Photogrammetry. proceedings of Kyoto congress. Comm. IV. pp 180-189.

- KRATKY V., 1988b. *Rigorous photogrammetric processing of Spot images at CCM Canada*. Actes du Symposium international sur les applications topographiques des données SPOT. Sherbrooke, Québec, 1988. pp 35-50.
- KRATKY V., 1989. *On-line aspects of stereophotogrammetric processing of Spot images*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol55 n°3, Mar89, pp 311-316.
- KRUCK E., 1987. *BINGO Bundle adjustment program*. Seminar on Photogrammetric Mapping from Spot imagery. Hannover. Sept. 21-23 1987.
- LAMOURE J., 1991. *TRASTER T10 Uses SPOT Stereo-Pair for Digital Elevation Data Extraction*. Geodetical Info Magazine. June 1991. pp68-70.
- LE COCQ C., 1983. *Introduction à la géodésie spatiale*. Cours ENSG. 1983.
- LE COCQ C., 1984. *Introduction à la géodésie physique*. Cours ENSG. 1983.
- LEE L.H., CHEN L.C., 1988. *Bundle adjustment with additional parameters for Spot stereopairs*. International Archive of Photogrammetry. Kyoto. Commission III, p III.1-10.
- LERCH F.J., 1991. *Optimal data weighting and error calibration for estimation of gravitational parameters*. Bulletin géodésique. vol 65 n°1(1991). pp44-52.
- LIAO Y.C., PERNG M.S., 1990. *Influence of control point distribution and selection of dynamic orientation on the accuracy and reliability of Spot bundle adjustment*. International archive of Photogrammetry Vol28 t3/2. Comm. III. Proceedings of the Symposium on Progress in data analysis. Wuhan. pp 451-468.
- MASSON D'AUTUME G., 1979. *Le traitement géométrique des images de télédétection*. Bul. Inf. IGN 79/3.
- MASSON D'AUTUME G., 1985. *Triangulation spatiale avec SPOT*. Mensuration Photogrammétrique Génie rural. 9/85. pp 339-342
- MILLION C., 1991. *L'utilisation des mesures saisies en vol en aérotriangulation*, Thèse de Doctorat. ENSG Paris.
- MORITZ H., 1980. *Geodetic Reference System 1980*. Bulletin Géodésique . vol 54 n°3 , année 1980. pp 395-405.
- MORRIS A.C., STEVENS A., MULLER JP., 1988. *Ground control determination for registration of satellite imagery using digital map data*. Photogrammetric record, 12(72). pp 809-822 (oct 1988)
- MUKAI Y., SUGIMURA T., ARAI K., 1990. *Generation of digital elevation model using system corrected Spot data* International archive of Photogrammetry Vol28 t4. Commission IV. Proceedings of the Symposium on Cartographic and data base applications of photogrammetry and remote sensing. Tsukuba. pp 49-57.
- MUNIER P., RIVEREAU J.C., 1989. *Map production and map updating using Spot data*. Paper prepared for the OEEPE Workshop in UCL London sept.89.

- MURRAY K.J., FARROW J.E., 1988. *Experiences producing small scale line mapping from Spot imagery*. International Archive of Photogrammetry. proceedings of Kyoto congress. Comm. IV. ppIV.407-421.
- MURRAY K.J., NEWBY P.R.T., 1990. *Mapping from SPOT imagery at the Ordnance Survey*. International archive of Photogrammetry Vol28 t4. Commission IV. Proceedings of the Symposium on Cartographic and data base applications of photogrammetry and remote sensing. Tsukuba. pp 430-438.
- NAGY T., 1988. *Large area triangulation with Spot imagery*. TRIFID Corporation.
- NING Shu, 1987. *Restitution géométrique des images spatiales par la méthode de l'équation de colinéarité*. Bul. SFPT n°105 (1987-1). pp27-40.
- OEEPE, 1991. *Test of triangulation of Spot data..* Rapport préparé par I. Dowman. Publication officielle de l'OEEPE à paraître.
- PADERES F., MIKHAIL E.M., FAGERMAN J.A., 1989. *Batch and on-line evaluation of stereo Spot imagery*. Technical papers 1989 ACSM-ASPRS Annual Convention.
- PRIEBBENOW R., CLERICI E., 1988. *Cartographic applications of Spot imagery*. International Archive of Photogrammetry. Proceedings of Kyoto congress. Comm. IV. pp 289-297.
- PRIEBBENOW R., 1989. *Development of an analytical restitution method for Spot imagery with application to topographic mapping in Australia*. Doctoral Thesis, University of Queensland.
- RODRIGUEZ V., GIGORD P., GAUJAC A.C., MUNIER P., BEGNI G., 1988. *Evaluation of the stereoscopic accuracy of the Spot satellite*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol54 n°2, Feb88, pp 217-221.
- ROLLIN J., DOWMAN I.J., 1988. *Map Compilation and Revision in Developing Areas : Test of Large Format Camera*. OEEPE Official Publication n°22. Août 88.
- SALAMONOWICZ P.H., 1986. *Satellite orientation and position for geometric correction of scanner imagery*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol52. n°4. Apr86. pp 491-499.
- SHARPE B., WIEBE K., 1988. *Planimetric accuracy in satellite mapping*. International Archive of Photogrammetry. Proceedings of Kyoto congress. Comm. IV. pp 341-349.
- SHARPE B., WIEBE K., 1988. *Reduction of Ground Control Requirements by Pass Processing*. International Archive of Photogrammetry. proceedings of Kyoto congress. 1988. Comm. IV. pp 350-357.
- SHARPE B., WIEBE K., 1989. *Reduction of Ground Control Requirements for Spot imagery by Pass Processing*. Proceedings of IGARSS'89. pp 142-145.
- STX, 1991. *STX Remote Sensing Services*. Nouvelles de Spot. n°15 juin91. p 10-12.
- TATEISHI R., KURONOMA Y., ANZAI F., 1988. *Evaluation of Spot data for topographic mapping without GCP*. International archive of Photogrammetry. Proceedings of Kyoto congress. 1988. Comm IV. pp 405-411.
- TOUTIN T., 1985. *Analyse mathématique des possibilités cartographiques du système Spot*. Thèse de Docteur-Ingénieur en sciences géodésiques. ENSG. Paris

- TOUTIN T., CARBONNEAU Y., 1990. *Multi-stereoscopy for the correction of Spot-HRV images*. International archive of Photogrammetry Vol28 t4. Commission IV. Proceedings of the Symposium on Cartographic and data base applications of photogrammetry and remote sensing. Tsukuba. pp 298-313.
- TYLER W.A., REED L.E., 1991. *Satellite mapping using off-nadir Spot panchromatic data*. Technical papers 1991 ACSM-ASPRS Annual Convention. Vol3:447-454.
- VEILLET I., 1988. *Expériences franco-canadiennes sur la spatiotriangulation, la précision planimétrique et altimétrique*. Actes du Symposium international sur les applications topographiques des données SPOT. Sherbrooke, Québec, 1988. pp 153-168.
- VEILLET I., 1989a. *L'Action de Développement, Evaluation, Formation sur Spot (ADEF) : Triangulation spatiale d'un bloc d'images Spot*. Bul.Inf.IGN.n°57 (89/3).
- VEILLET I., GUILLOUET G., 1989b. *Stéréopréparation d'images Spot : république de Djibouti.1988*. Rapport interne IGN (SPS-DTHF) du 17.1.89.
- VEILLET I., GUILLOUET G., 1989c. *Triangulation spatiale d'un bloc d'images Spot : république de Djibouti*. Rapport interne IGN (STN) du 6.3.89.
- VEILLET I., 1990a. *Spot data geometric processing for topographic mapping: Block adjustment of Spot images for large area topographic mapping*. International archive of Photogrammetry Vol28 t3/2. Commission III. Proceedings of the Symposium on Progress in data analysis. Wuhan. pp 926-935.
- VEILLET I., 1990b. *Apport d'un calcul de triangulation spatiale de bloc à un chantier étendu de cartographie topographique issue d'images Spot (KETIR)*. Note interne IGN. STN 1056 du 20.06.90.
- WESTIN T., 1989. *Geometric adjustment of Spot scenes*. Remote Sensing n°18 june 1989. Swedish Space Corporation.
- WESTIN T., 1990. *Precision rectification of Spot imagery*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol56. n°2. Feb90. pp 247-253.
- WILSON W., 1989. *Simultaneous block triangulation of the OEEPE Spot data set*. TRIFID Corporation. Paper prepared for the OEEPE Workshop in UCL London sept.89.
- WU C.H., EHLERS M., 1991. *The use of Spot on-board data in bundle adjustments*. Technical papers 1991 ACSM-ASPRS Annual Convention. Vol5:407-411.

