

B.3 Aérotriangulation analytique, GPS absolu et autres problèmes

Philippe Hottier

Le GPS peut donner les coordonnées d'une antenne embarquée sur un avion à probablement 0,10 m près (en mode GPS absolu). Donc, en principe, en mode GPS absolu, aucun appui-terrain ne serait nécessaire pour un bloc de bandes de prises de vue aérienne (pour une seule bande, ce serait évidemment incorrect). D'où il serait possible de faire de substantielles économies : avec l'équipement courant actuel (en GPS relatif), les coordonnées des sommets sont données par bande, à une translation près, ce qui nécessite un équipement au sol.

Cet article examine ce que peut apporter le GPS absolu. On s'appuie essentiellement ici sur les images prises à différentes échelles lors du vol de la caméra numérique sur Amiens en 2000. Outre l'utilisation de la caméra numérique développée par le LOEMI de l'IGN, cette mission a eu la particularité d'être accompagnée d'une mesure de la position de l'avion en GPS absolu.

Vol d'Amiens 2000

L'essai mené sur le vol d'Amiens 2000 a d'abord déçu, faute de connaître certains paramètres, de façon sûre. Cependant disons tout de suite que l'on peut obtenir de très bons résultats en planimétrie à condition que les bandes longitudinales soient volées en sens contraire. Par contre, il subsiste un biais en altimétrie.

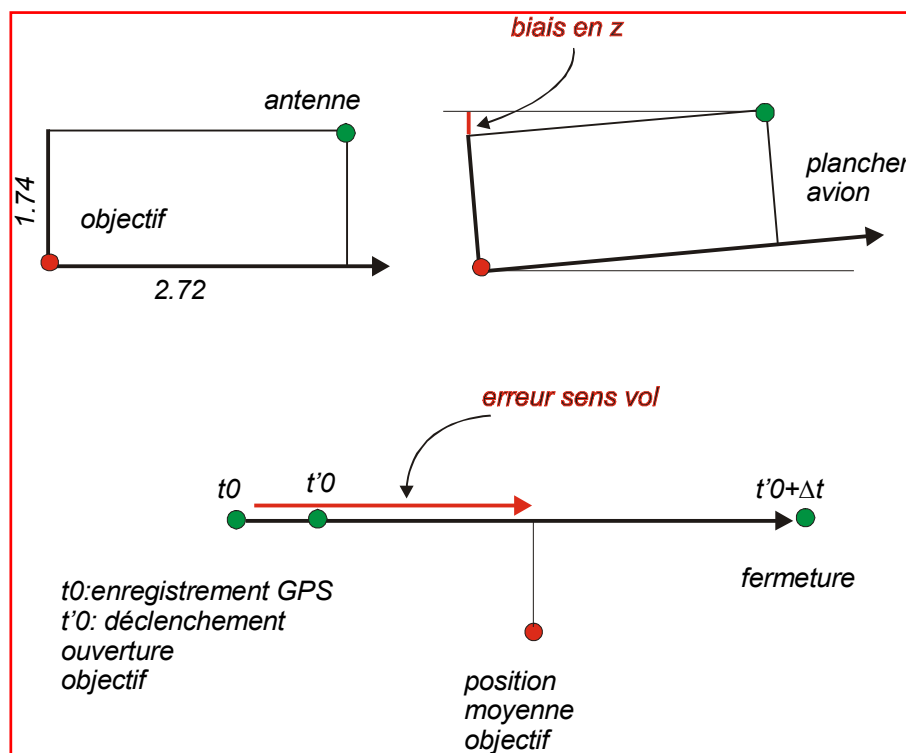


figure B.3.1

Le problème est le suivant :

- On ne connaît pas exactement la quantité à soustraire au z du point GPS pour obtenir l'altitude de l'objectif. L'antenne est en avant de l'objectif à la distance de 2,72 m. Or, l'avion est sans doute incliné en vol et une inclinaison de 5° pour une distance de 2,72 m correspond à un biais de 0,24 m. Ce biais est équivalent à une imprécision sur la focale. Dans le cas d'Amiens, le biais est de - 0,40 m, si les données sur le positionnement de l'antenne par rapport à l'objectif sont exactes. La focale est peut-être inexacte d'un peu plus d'un pixel. Il se pourrait qu'il y ait aussi un biais sur les données altimétriques GPS. Si la focale et les données GPS sont exactes, c'est alors que l'avion est incliné vers le bas.
- Il y a une erreur clairement liée au sens de vol qui atteint plus de deux mètres sur Amiens. On peut d'abord songer à une erreur de synchronisation entre le signal GPS (t_0) et le début t'_0 de l'ouverture de l'obturateur, à quoi il faut ajouter le demi-temps moyen Δt d'ouverture.

De t_0 à t'_0 , l'avion se déplace d'une quantité Δl_1 et de t'_0 à $t'_0 + \Delta t$ d'une quantité Δl_2 . La position moyenne de l'objectif correspond à $\Delta l_1 + \Delta l_2 / 2$ qui est, en l'absence d'autres erreurs, égale à l'erreur de sens de vol. Mais, d'après le laboratoire OEMI, les temps $t'_0 - t$ et Δt seraient de l'ordre de 1 ms, avec une vitesse de 100 m/sec, il faudrait trouver 50 ms pour expliquer ces deux mètres. Il est peu probable, d'autre part, qu'il s'agisse d'une erreur d'étalonnage de la caméra (deux mètres correspondent à sept pixels). Y aurait-il alors un biais GPS en relation avec la variable temps ?

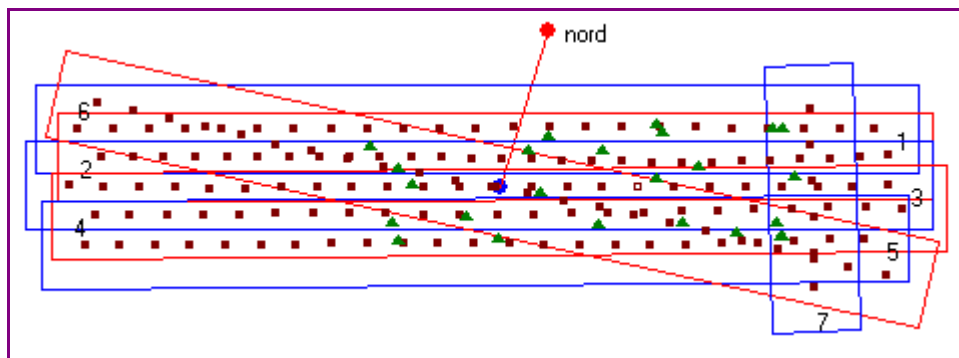


figure B.3.2 Amiens 31 cm, GPS absolu. Les triangles verts sont des points de contrôle (inactifs dans les calculs). Focale 40 mm. Format 4 096 x 4 096 pixels. Altimétrie de vol 1 400 m. Pixel-terrain : 31 cm. Les points-terrain et les points GPS sont exprimés dans le Lambert 93. 25 000 points-image environ.

Le biais en z est inaccessible en mode GPS absolu. Par contre, on peut parfaitement déterminer l'erreur de sens de vol si les bandes longitudinales sont volées en sens contraire. Ainsi, dans le cas de ce bloc et si on ne cherche pas à estimer l'erreur de sens de vol, on obtient à la sixième itération, les très médiocres résultats suivants :

tableau B.3.1 : 0 appui-terrain. Sans estimation erreur sens de vol (unité mètre)

	24 contrôles-terrain		GPS	
	emq _{xy}	emq _z	rmq _{xy}	rmq/z
mode GPS absolu	1,80	0,80	2,10	0,13

Cette extraordinaire médiocrité est due aux tensions entre bandes. Pour résoudre le problème, il suffit d'estimer l'erreur de sens de vol. Cela se fait très simplement en projetant les résidus de compensation aux points GPS sur la direction de vol. En quelques itérations supplémentaires, on arrive au but : l'erreur est évaluée à 2,32 m et les résultats tout à fait satisfaisants.

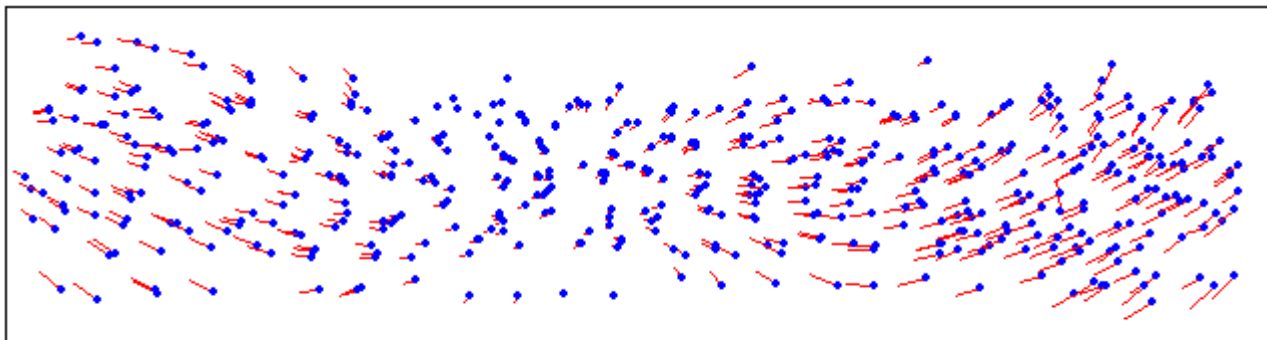
tableau B.3.2 : après estimation erreur sens de vol (unité mètre)

	24 contrôles-terrain		GPS	
	emq _{xy}	emq _z	rmq _{xy}	rmq/z
mode GPS absolu	0,30	0,24	0,02	0,07

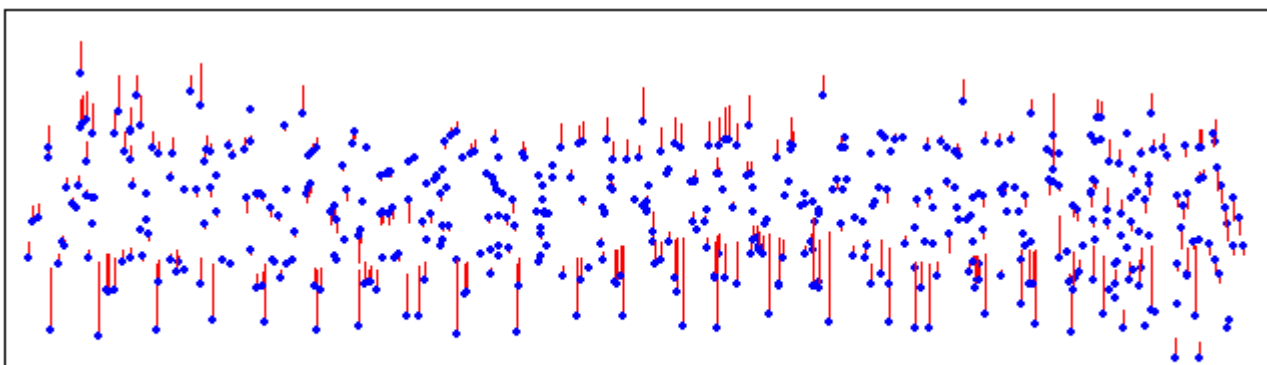
Ils sont tout à fait comparables à ceux obtenus en mode GPS relatif lorsqu'on tient compte du fait que la méthode d'estimation de l'exactitude sur des appuis flatte ici les résultats de l'ordre de 40% (Cette méthode consiste, en fin de compensation, à calculer les coordonnées 3-D des appuis sans tenir compte des données 3-D, on estime alors l'emq comme la moyenne quadratique des écarts (point 3D compensé - point terrain).

tableau B.3.3 : en mode GPS relatif

	24 appuis-terrain		GPS	
	emq _{xy}	emq _z	rmq _{xy}	rmq/z
mode GPS relatif	0,22	0,19	0,03	0,07



Plani 8259 points de liaison
 Ecmq: 0.185; Ecart max: 2.434; HT: 2; ecmqSansHT= 0.182; biais en x: -0.14; en y: -0.064



Alti 8259 points de liaison
 Ecmq: 0.261; Ecart max: 5.760; HT: 138; ecmqSansHT= 0.217; biais: 0.114

figure B.3.3 : comparaison des écarts : mode GPS absolu (balise éloignée) moins GPS relatif (jeu GPS relatif). Noter les écarts importants en z au bord de la bande inférieure. Ils sont dus à la fragilité du mode GPS relatif en cas de canevas d'appui insuffisant.

Remarques

1. Le traitement du bloc en mode GPS relatif (avec appuis-sol, bien entendu) avec le jeu GPS absolu fait très bien apparaître l'erreur sens de vol. Le tableau B.3.4 montre les translations-bandes, c'est à dire les corrections qu'il faut ajouter aux coordonnées GPS et au vecteur-antenne pour obtenir les coordonnées du sommet du faisceau, issue de deux logiciels *BottomAero* et *TopAero*.

tableau B.3.4

Traitement du jeu GPS absolu : balise lointaine, Lambert 93
 en mode GPS relatif (avec appuis sol) : valeurs des translations-bande pour les sept bandes.
 (Unité mètre. Vecteur-antenne - 2,72 ; 0,20 ; -1,26). Noter, en particulier, le résultat de la bande 6 qui est E-O.

1	-2,5	-0,5	0,0
2	2,2	0,8	0,0
3	-2,1	-0,7	0,0
4	2,4	0,3	-0,1
5	-1,3	-2,2	-0,4
6	2,4	0,0	0,0
7	-1,5	2,0	0,0

BottomAero

1	-2,2	0,0	-0,2
2	2,2	1,0	0,0
3	-2,2	-0,7	0,0
4	2,5	0,5	-0,2
5	-1,5	-1,9	-0,5
6	2,4	0,0	-0,1
7	-1,5	1,6	-0,2

TopAero

2. Les données d'Amiens étaient exprimées dans le Lambert 93. Lorsqu'on effectue les calculs en mode GPS absolu, il convient de tenir compte de ce fait et non pas de convertir ces données en euclidien, en assimilant localement la projection à une projection stéréo-graphique polaire, comme on fait souvent en mode GPS relatif.

Car si cela est sans conséquence en mode relatif, l'altération linéaire entre en jeu en mode GPS absolu et introduit un biais supplémentaire en z.

3. Pour cet essai, il y a eu un jeu de coordonnées GPS relatif et deux jeux de coordonnées GPS absolu. Pour le premier, la balise d'enregistrement était proche du chantier, et, pour l'autre, elle était éloignée. Les résultats ci-dessus concernent à la balise éloignée. Avec l'autre jeu, on obtient les mêmes résultats, au centimètre près, sur les vingt-quatre points de contrôle et à quelques centimètres près la même erreur sens de vol. On observe cependant un décalage systématique entre les résultats au sol.

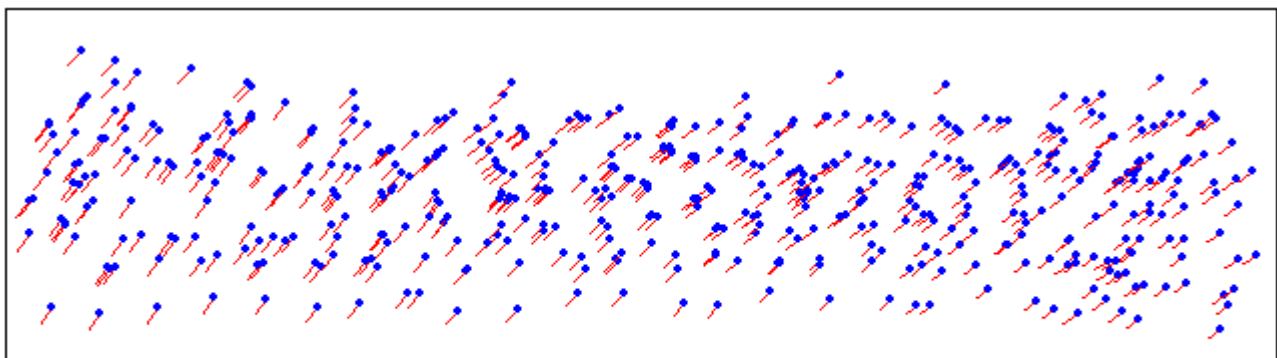
4. Ce décalage est induit par une distorsion entre les deux jeux de données GPS absolu. L'examen des données montre, pour toutes les bandes sauf la bande 7 (la bande transversale verticale), un écart (loin - proche) d'environ - 12 cm en x et de - 15 cm en y. L'écart en z reste faible mais variable. La bande 7 présente une anomalie assez grave : le décalage est en effet de - 48 cm en x, de - 56 cm en y et de 29 cm en z. C'est très probablement le jeu balise éloigné qui est biaisé, car si on met en place la seule bande 7 en mode GPS relatif, on trouve une meilleure mise en place avec le jeu balise éloignée.

La disposition des points-terrain (figure B.3.2) est mauvaise : les extrémités bandes ne sont pas équipées, non plus que les bords extrêmes des bandes supérieure et inférieure. On constate, ici, un avantage certain du mode GPS absolu : les écarts au sol entre les points issus des deux jeux GPS absolu sont bien plus homogènes que les écarts issus des jeux GPS absolu et GPS relatif.

tableau B.3.5

Estimation translation bande 7 en mode GPS relatif après compensation. Les écarts constatés sont identiques à ceux des jeux de données.

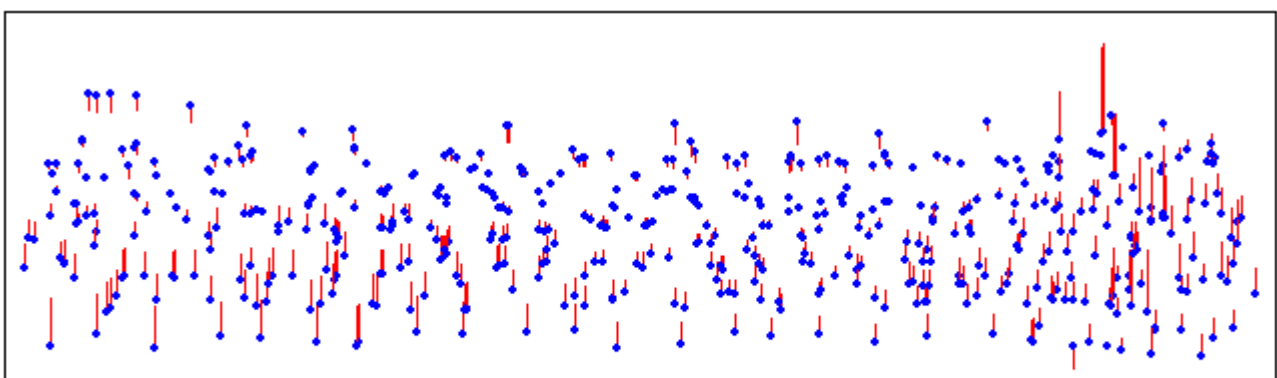
	X	y	z
balise éloignée	-0,71	-0,39	0,00
balise proche	-1,20	-0,95	0,29



Plani 8282 points de liaison

Ecmq: 0.238; Ecart max: 0.292; HT: 0; ecmqSansHT= 0.238; biais en x: -0.12; en y: -0.205

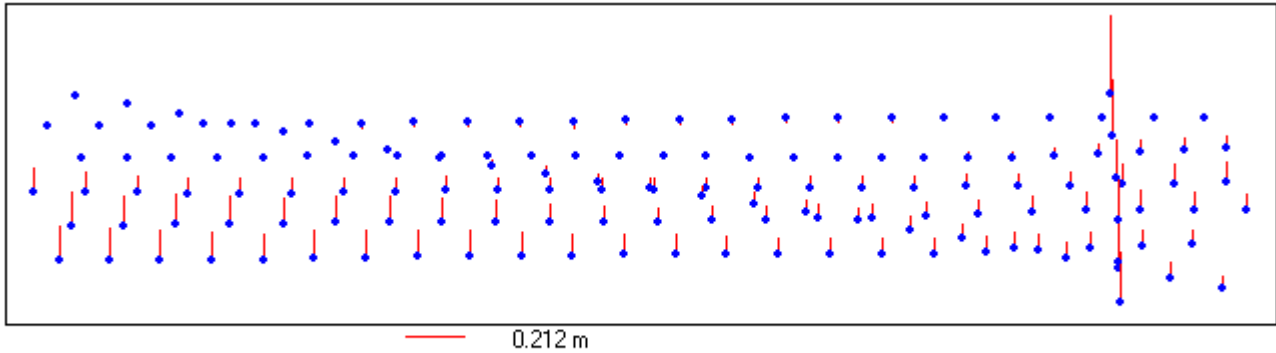
figure B.3.4 : GPS absolu sans appui : écarts planimétriques au sol, selon qu'on utilise la balise proche ou la balise éloignée (balise éloignée moins balise proche). Comparer à la figure B.3.3, noter un accord bien meilleur en z en particulier sur le bord inférieur. Quant aux écarts en xy, ils sont bien plus homogènes et reflètent le biais entre les deux jeux.



Alti 8282 points de liaison

Ecmq: 0.075; Ecart max: 0.395; HT: 0; ecmqSansHT= 0.075; biais: 0.049

figure B.3.4 bis : idem figure B.3.4 pour écarts altimétriques



Alti 149 faisceaux

Emq: 0.071; Ecart max: 0.286; HT: 0; emqSansHT= 0.071; biais: 0.050

Le biais entre les deux jeux de coordonnées GPS apparaît clairement, il est peu acceptable sur la bande verticale.

figure B.3.4 ter : écarts aux sommets. Le biais entre les deux jeux de coordonnées GPS apparaît clairement, il est peu acceptable sur la bande verticale.

5. Les bandes transversales n'apportent rien en mode GPS absolu. Les écarts moyens quadratiques évalués sur 7 000 points 3-D, entre les compensations avec et sans bandes transversales, sont 6,3 cm en planimétrie et 6,7 cm en altimétrie. Si l'on fait l'essai homologue avec le jeu GPS relatif et vingt-quatre appuis, on trouve 5,3 cm en planimétrie et 18 cm en altimétrie. Dans ce dernier cas, des écarts systématiques atteignant 40 cm sur les bords sont dus sans doute à l'insuffisance de l'équipement.

6. L'erreur du sens de vol apparaît aussi quand on utilise le jeu GPS relatif. Elle explique les distorsions entre les xy des translations-bande, car les bandes longitudinales sont volées en sens contraire.

7. Naturellement, le biais en z peut être résorbé avec quelques appuis en z. Ces appuis doivent figurer sur le plus grand nombre possible de clichés et donc plutôt dans la zone centrale du bloc. Ainsi, avec le vecteur-antenne (-2,72 ; -0,2 ; -1,74), on trouve sans appui et sur vingt contrôles : 0,31 m pour l'emq en xy et 0,47 m en z. Quatre appuis au centre du bloc résolvent le problème du biais. On trouve finalement 0,27 m en xy et 0,26 m en z.

tableau B.3.6

Traitement du jeu GPS relatif (Lambert 93) :
valeurs des translations-bande pour les sept bandes (unité mètre, vecteur-antenne - 2,72 ; - 0,20 ; - 1,26).

1	-2,5	-0,5	0,0	1	-2,2	0,0	-0,2	1	1,6	1,0	1,8
2	2,2	0,8	0,0	2	2,2	1,0	0,0	2	1,4	0,8	2,3
3	-2,1	-0,7	0,0	3	-2,2	-0,7	0,0	3	1,4	0,6	2,0
4	2,4	0,3	-0,1	4	2,5	0,5	-0,2	4	1,6	0,1	1,7
5	-1,3	-2,2	-0,4	5	-1,5	-1,9	-0,5	5	2,2	-0,6	1,5
6	2,4	0,0	0,0	6	2,4	0,0	-0,1	6	1,6	0,4	1,7
7	-1,5	2,0	0,0	7	-1,5	1,6	-0,2	7	0,9	0,0	1,7
BottomAero				TopAero				après correction			

À droite, les x et les y ont été corrigés de l'erreur sens de vol (2,30 m dans l'axe bande) et les z de - 0,5 m).

Mode inertiel + GPS absolu

C'est le rêve : plus d'aérotriangulation analytique. Finis, les dizaines de milliers de points-image retenus actuellement pour faire une compensation, c'est-à-dire justement pour déterminer les coordonnées des sommets des faisceaux et leur orientation dans l'espace.

L'ennui est que les précisions avancées par les fabricants semblent insuffisantes. Ainsi, la firme *Applanix* annonce 0,2° pour le cap et 0,03° pour roulis et tangage (soit respectivement 3,5 et 0,5 mrd) ceci en *real time*. Ce sont sans doute des tolérances et il faut alors diviser par trois. Mais, même pour une courte focale comme celles des caméras numériques (< 50 mm), on comprend vite - et les essais le confirment - que cela est insuffisant : 1 mrd à 50 mm correspond à 50 μm soit plus de sept pixels, si le pixel vaut 9 μm.

Dans le deuxième mode proposé par le fabricant, le mode re-traité, on annonce 0,05° pour le cap et 0,01° pour roulis et tangage (soit 0,8 et 0,17 mrd). S'il s'agit de tolérances, même pour une focale courte, et comparées au

processus actuel, c'est encore insuffisant. La simulation sur un bloc comme celui d'Amiens 31 cm montre que l'on obtient alors 0,24 m en planimétrie, ce qui est bien, mais 0,60 m en altimétrie, ce qui l'est beaucoup moins. D'autre part, il convient de ne pas oublier les deux problèmes signalés plus haut : le biais en z et l'erreur de sens de vol.

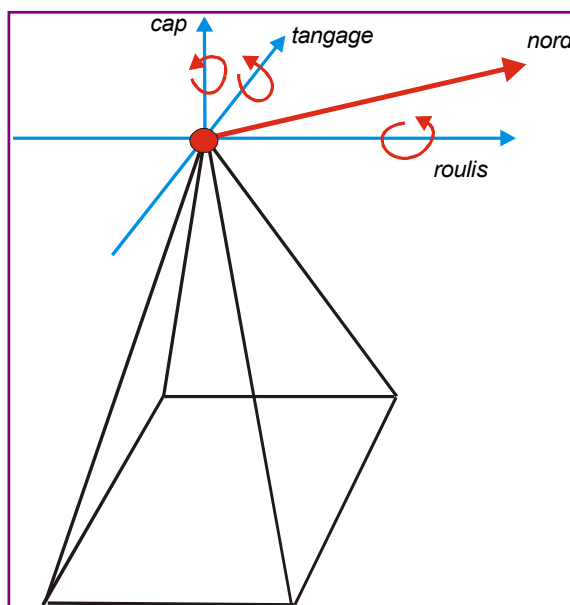


figure B.3.5

Mode avant-arrière

Le format de la caméra numérique du laboratoire OEMI est 4 096 x 4 096. Le côté du récepteur élémentaire est de 9 μm . La distorsion photogrammétrique est très forte : en bordure de champ, elle atteint 153 μm , soit dix-sept pixels avec une focale de 50 mm (ou même 40 mm), l'angle de champ est faible (40° pour 50 mm).

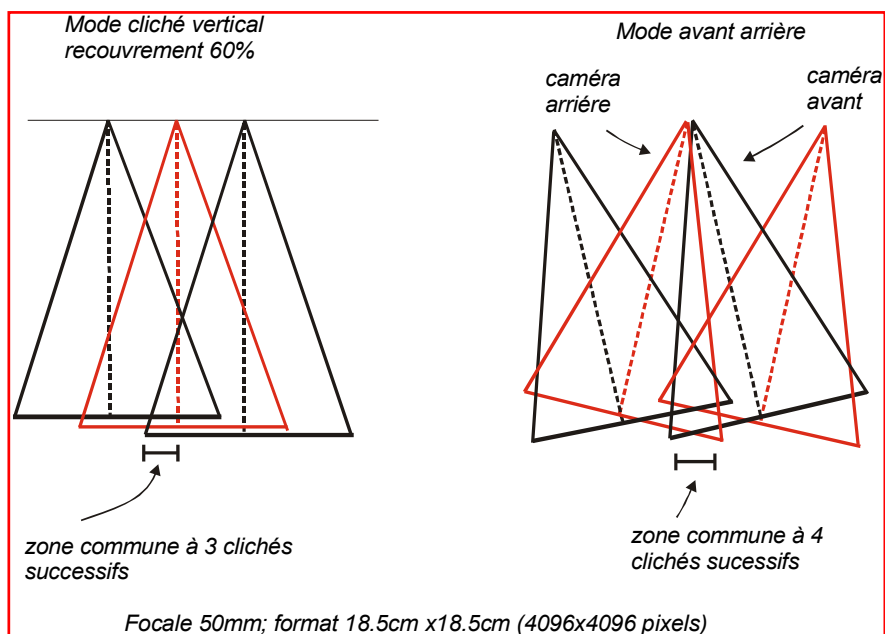


figure B.3.6

Ceci conduit à de faibles rapports base/hauteur de vue. D'autre part, les petites focales conduisent à des hauteurs de vol faibles donc à des surfaces couvertes faibles. Il suffit de comparer de ce point de vue avec les possibilités des caméras aériennes classiques : pour le même pixel-terrain, disons 25 cm avec une caméra argentique de focale 150 mm (résolution 25 μm = 1 pixel, échelle 1 : 10 000) et un format 200 x 200 mm (8 000 x 8 000 pixels).

On couvre avec un recouvrement de 60% un rectangle 2 000 x 1 200 m et le rapport base/hauteur de vue est de 0,53. Avec une caméra numérique de focale 50 mm (pixel-image de 9 μm , échelle 1 : 28 000), et avec le même recouvrement, on couvre 1 000 x 600 m, soit une surface quatre fois moindre et le rapport base/hauteur de vue n'est que

de 0,28. D'où l'idée d'associer deux caméras inclinées, une caméra avant et une caméra arrière avec un léger recouvrement : la surface couverte double (1 000 x 1 200 m), ainsi que le rapport base/hauteur de vue (Cf. figure B.3.6).

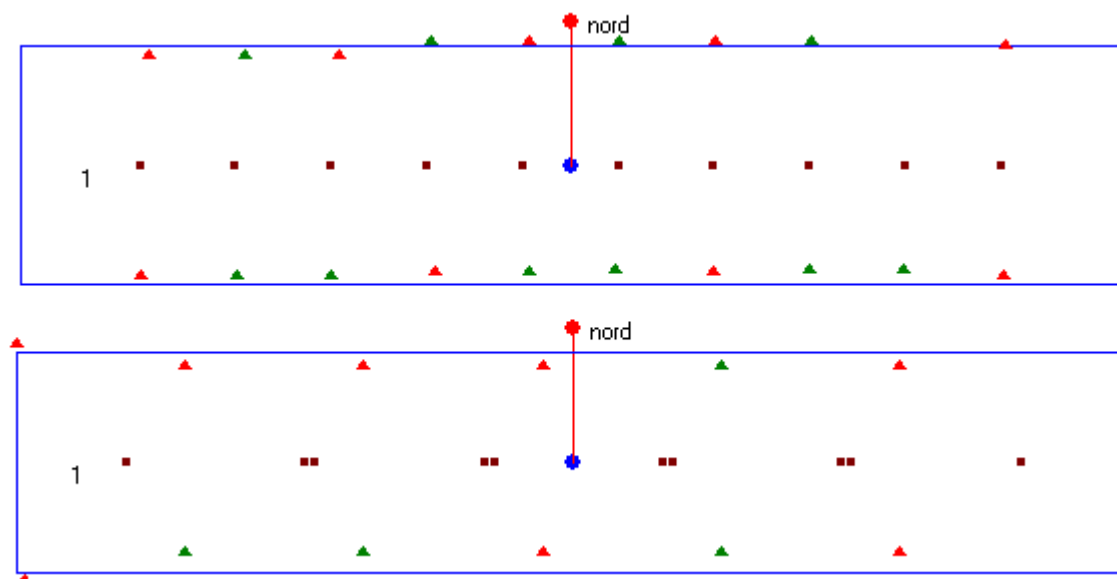


figure B.3.7 : en haut, une bande de dix clichés en mode vertical, en bas en mode avant arrière. En mode vertical, la base est d'environ 400 m contre 800 m en mode avant arrière (focale 51 mm, format 4 096 x 409, pixel 9 μ m, altimétrie de vol 1 400 m).

Simulations

Elles ont été faites pour une caméra numérique de focale 51 mm pour la caméra arrière, 52 mm pour la caméra avant, avec un format de cliché 4 096 x 4 096 pixels. L'altimétrie de vol était de 1 400 m sur Amiens. Dans ces conditions, le pixel-terrain vaut environ 25 cm. Les coordonnées des points-image ont été bruitées avec une emq de 0,33 pixel et les données GPS avec une emq de 15 cm en planimétrie et en altimétrie.

On a pris un bloc de six bandes de vingt clichés et envisagé deux cas : un recouvrement interbande de 20% et un recouvrement interbande de 60%. Les résultats évalués, sur une centaine de points de contrôle, figurent dans le tableau B.3.7 :

tableau B.3.7 : cas d'un bloc de six bandes de vingt clichés

mode	recouvrement interbande	emq xy (en m)	emqz (en m)
vertical	20%	0,08	0,19
avant-arrière	20%	0,09	0,16
vertical	60%	0,08	0,20
avant-arrière	60%	0,07	0,14

On s'attendait à un accroissement de l'exactitude en altimétrie, c'est effectivement le cas. Mais cet accroissement est moins fort que ne le laisse espérer la formule théorique. En divisant le rapport b/h par deux, on devrait obtenir une exactitude deux fois meilleure, mais cette formule ne vaut que pour des points de couple et dans le cas de nos simulations la majeure partie des points appartient à plus de deux clichés. Quand on fait les simulations avec une seule bande, l'accroissement d'exactitude est de l'ordre de 50%.

tableau B.3.8 : cas d'une seule bande de vingt clichés

mode	emq xy (en m)	emqz (en m)
vertical	0,18	0,40
avant arrière	0,18	0,22

Les modifications à apporter au logiciel pour lui permettre d'absorber le mode avant-arrière peuvent se réduire à peu de chose : essentiellement, à une mise en place des faisceaux tenant compte de l'inclinaison relative des axes optiques avant et arrière. Il faut, de plus, tenir compte des caractéristiques des deux caméras, ainsi que de la distance entre les deux centres optiques.

On peut aussi tenir compte du fait que les deux caméras forment un ensemble rigide, ce qui *a priori* est plus élégant. Dans ce cas, on diminue le nombre d'inconnues de faisceaux par deux, mais il y a un problème à résoudre : il faut pouvoir apprécier par le calcul l'imprécision sur les données d'orientation relative des deux caméras résultant de leur mise en place en atelier : un défaut d'orientation de 0,001 rd non corrigé conduit à des résultats inacceptables.

C'est tout à fait possible, mais oblige à des précautions : les trois inconnues de systématisme permettant de résoudre ce problème ne peuvent être introduites dans les équations que lorsque les inconnues de translation-bande sont devenues stables. Cependant, les simulations effectuées par cette méthode (un peu délicate à mettre au point) n'ont pas montré d'améliorations significatives.

Bandes transversales ?

Pour un bloc équipé en GPS relatif, les appuis ont essentiellement pour fonction de permettre d'estimer les translations-bande. La remarque a été faite, depuis un certain temps, qu'un très petit nombre d'appuis pourrait suffire mais qu'il est souhaitable - pour éviter le pivotement des bandes autour de leur axe - de prévoir des bandes transversales.

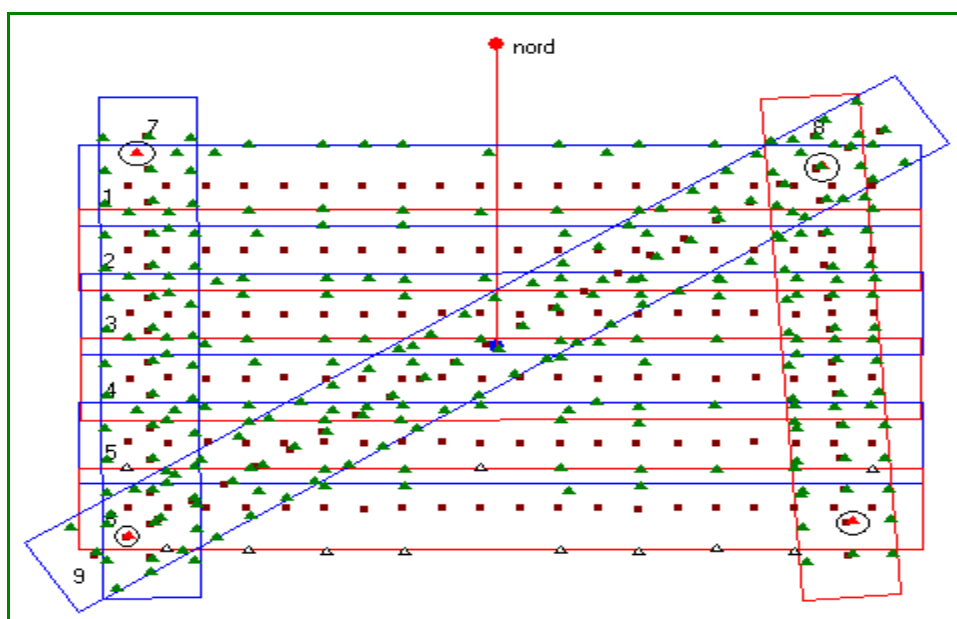


figure B.3.8 Bandes transversales : quatre appuis seulement aux quatre coins (focale 50 mm, caméra numérique 4 096 x 4 096 pixels, altimétrie 1 400 m, pixel-terrain 25 cm). Recouvrement interbande de 20% : on trouve 0,103 m en xy et 0,365m en altimétrie.

Les simulations le confirment. Celles du tableau B.3.9 ont été faites avec les hypothèses suivantes : emq planimétrique de 15 cm et emq altimétrique de 15 cm, tant pour les données GPS que pour les données relatives aux appuis, emq de pointé sur les points-image de 0,33 pixel. On a pris un bloc numérique avec un recouvrement interbande de 20% (figure B.3.8).

La disposition avec deux bandes transversales verticales et une diagonale semblent être effectivement la plus favorable. Mais si on reprend les essais avec un recouvrement interbande de 60%, le gain n'apparaît guère. En mode GPS absolu, les simulations montrent qu'il est nul. Il ne s'agit que de simulations, mais cela confirme l'essai fait avec le bloc réel d'Amiens 31cm : voir la remarque 5 page 51.

Cependant, il y a un contre-exemple : Amiens 25 cm (voir paragraphe suivant). Bien que le recouvrement interbande soit très fort, la présence des deux bandes transversales s'avère indispensable quand on réduit le canevas d'appui à quatre points (un dans chaque coin), du moins quand on traite l'ensemble des 50 000 points-image. Après un filtrage où on ne conserve que 7 000 points, il n'y a plus de différence avec ou sans bande transversale (voir tableau B.3.12).

tableau B.3.9

Recouvrement interbande de 20%				Recouvrement interbande de 60%			
Bandes transverses	appuis	emq _{xy}	emq _z	Bandes transverses	appuis	emq _{xy}	emq _z
0	45	0,18	0,28	0	38	0,19	0,23
0	1	0,38	2,20	0	1	0,25	2,50
0	2	0,36	0,53	0	2	0,20	0,27
0	4	0,30	0,63	0	4	0,21	0,31
2 verticales	4	0,23	0,31	2 verticales	4	0,21	0,25
3 verticales	4	0,21	0,34				
2 verticales - 1 diagonale	4	0,22	0,26				

À gauche : résultats obtenus (moyenne de quatre essais) avec le bloc de la figure B.3.9.

À droite : pour un bloc de six bandes également mais avec un recouvrement interbande de 60%.

NB : Les appuis dans ces essais ont été choisis dans les quatre coins du bloc et non pas comme en mode GPS absolu au centre du bloc (voir page 51 remarque 7).

Le systématisme

Il provient, sans doute, essentiellement d'une insuffisance d'étalonnage de la caméra. Il peut y avoir un biais sur la focale et la position du point principal ainsi que des erreurs résiduelles importantes sur la distorsion. Pour les caméras numériques du laboratoire OEMI, cette distorsion est très importante. En GPS relatif avec appuis, il n'est pas question (en tout cas, en terrain plat) de déterminer une correction de focale ni une correction de point principal car les erreurs correspondantes sont absorbées par les translations-bande.

Par contre, le systématisme résiduel cliché peut être évalué et corrigé dans tous les cas. Il est modélisé par neuf vecteurs aux sommets d'une grille 3 x 3 superposée au cliché l'interpolation au sein d'un des neuf carreaux se faisant par spline d'ordre 2, il y a donc dix-huit inconnues mais il convient de poser trois conditions :

- pas de changement d'échelle (qui correspond à une variation de focale) ;
- pas de translation (qui correspond à un biais sur le point principal) ;
- pas de rotation.

Il y a ici une remarque à faire : ces inconnues sont souvent peu efficaces s'il y a de nombreux appuis bien répartis, car alors ces appuis empêchent le systématisme de se propager. On ne s'aperçoit de l'existence de ce systématisme que si le nombre d'appuis est faible et c'est là que leur emploi s'avère intéressant. Ainsi, pour le bloc numérique réel Amiens 25 cm (tableau B.3.10, page suivante) qui comporte vingt-cinq appuis en xyz et vingt appuis en z, on observe, avec tous les appuis, un gain de 20% en altimétrie avec les inconnues de systématisme, mais si on ne prend que quatre appuis et si on conserve les bandes transversales le gain pour les points connus en z seulement est de 50%. Les chiffres du tableau B.3.10 sont les moyennes de quatre essais correspondant à des choix différents des quatre appuis.

Pourquoi le gain est aussi important pour les points connus en z seulement ? Cela reste une énigme : les contrôles connus en z seulement figurent, en moyenne, sur autant de clichés que les contrôles connus en xyz mais ont été pointés lors d'une seconde opération et avec une moindre précision. On peut alors avancer l'explication suivante :

- de toute façon, l'exactitude obtenue est limitée quelque soit le nombre de points-image par point 3-D ;
- les mesures-image correspondant à un contrôle connu en z seulement sont moins précises ;
- mais quand on introduit les inconnues de systématisme, le nombre de mesures corrigées est alors suffisant pour obtenir l'exactitude limite.

On notera que le résultat obtenu avec deux bandes transversales et quatre appuis (dans les coins) est - avec les inconnues de systématisme - identique à celui obtenu avec tous les appuis. Par contre (comparer avec le tableau B.3.9) sans bandes transversales le résultat est mauvais en z.

Remarques

Quand on corrige les coordonnées des points-image du systématisme, on trouve directement les bons résultats. Si l'on essaie d'évaluer à nouveau le systématisme résiduel par la même méthode, on le trouve fortement réduit et non significatif (de 0,42 pixel maximum, il passe à 0,12 pixel maximum). Par ailleurs, on trouve à 0,02 pixel près, les mêmes résultats que l'on opère sur tous les appuis (vingt-cinq en xyz et vingt en z) ou sur quatre appuis seulement.

tableau B.3.10 : Amiens 25 cm

	Syst	emq	emq _z	emq _z Seulement
2 bandes transversales - 25 appuis xyz, 20 z seulement	non	0,14	0,15	0,17
	oui	0,11	0,12	0,16
2 bandes transversales - 4 appuis xyz	non	0,20	0,28	0,41
	oui	0,19	0,22	0,22
0 bande transversale - 25 appuis xyz, 20 z seulement	non	0,15	0,35	0,36
	oui	0,12	0,32	0,33
0 bande transversale - 4 appuis xyz	non	0,21	0,69	0,74
	oui	0,21	0,66	0,70

Gain apporté par les inconnues de systématisme. L'apparent gain d'exactitude en z (15 cm au lieu de 35 cm avec l'équipement appuis maximal) avec les bandes transversales n'est pas confirmé par les simulations.

Si on utilise les inconnues de systématisme, il est *a priori* indiqué de corriger les coordonnées-cliché de ce systématisme dans toutes les applications ultérieures. Cependant, si on ne corrige pas les coordonnées-clichés du systématisme calculé, l'incidence est faible pour les points 3-D se trouvant sur de nombreux clichés. Par exemple, avec Amiens 25 cm, deux bandes transversales et quatre appuis seulement, que l'on corrige ou non les coordonnées-cliché du systématisme trouvé (qui atteint 0,4 pixel), on trouve les mêmes résultats : 0,20 m sur les points de contrôle mais ceux-ci appartiennent en moyenne à plus de dix clichés ; mais il y a quelques écarts importants en z (avoisinant le mètre) relatifs à des points de couple situés près d'un bord cliché, là où le systématisme est le plus fort.

Que l'on corrige ou non le systématisme, souvent - mais pas toujours - : voir Amiens 25 cm ou Antifer, tableau B.3.11, on ne s'en aperçoit guère sur les points de contrôle ou d'appui, ce qui fait croire à son inefficacité. En effet, contrôles et appuis se trouvant sur plus de six clichés en moyenne, les erreurs de systématisme se compensent, mais la comparaison des déterminations fait toujours apparaître des écarts significatifs en bord de bloc là justement où le nombre de points-image par point 3-D est le plus faible.

tableau B.3.11

	sans systématisme		avec systématisme	
Amiens 25 cm tout appui (24)	0,14	0,15	0,11	0,12
Amiens 31 cm tout appui (24)	0,22	0,19	0,21	0,22
Amiens 50 cm (17 xyz, 2 z)	0,97	0,37	0,96	0,38
SPCN 1507 (46 xyz, 192 z)	0,32	0,29	0,28	0,26
Antifer tout appui (56 xyz, 350 z)	0,40	0,47	0,32	0,30

Nombre points-image

Il semble très fortement exagéré pour les couvertures numériques : pourquoi 54 000 points-image sur le bloc Amiens 25 cm (deux cents quarante clichés : plus de deux cents points-image par cliché) alors que six à sept fois moins suffisent largement. Au delà de trente points-image par cliché (un cliché dépend de six paramètres), les erreurs ne se compensent plus.

On bute sur les limites imposées par la résolution et les erreurs systématiques résiduelles. Il semble, au contraire, que cela ne génère que des inconvénients : l'excès de mesures-cliché peut empêcher les moindres carrés de fonctionner correctement en faussant de façon irréaliste les poids relatifs des diverses catégories de mesure. Il est frappant, qu'en réduisant les points image à cinq par ligne nadirale (en tout : 8 900 points), l'on obtienne les mêmes résultats, et, que, les bandes transversales cette fois n'apportent rien. De plus, en cas de problèmes délicats, ils conduisent pour le logiciel *TopAero* à multiplier les itérations et à des instabilités en mode GPS relatif.

tableau B.3.12

	pts-image	transv.	emq _{xy}	emq _z	ecmq _{xy}	ecmq _z
Amiens 25cm 25 xyz, 19 z	54 000	oui	0,14	0,16		
	89 00	oui	0,09	0,17	0,07	0,11
	49 400	non	0,15	0,35	0,05	0,41
	8 200	non	0,10	0,16	0,07	0,12
Amiens 31cm 24 xyz	25 300	oui	0,21	0,21		
	3 750	oui	0,20	0,17	0,08	0,15
	20 900	non	0,21	0,22	0,06	0,18
	2 900	non	0,21	0,16	0,08	0,19
Amiens 50cm 17 xyz, 2z	69 800	oui	0,97	0,35		
	19 600	oui	0,95	0,40	0,29	0,36
	11 000	oui	0,93	0,40	0,32	0,40
	67 400	non	0,98	0,40	0,06	0,51
	19 200	non	0,95	0,43	0,28	0,44
	10 700	non	0,94	0,40	0,31	0,49

Exactitude obtenue en diminuant le nombre de points-image unité m), emq_{xy} et emq_z sont estimées Sur les appuis ; ecmq_{xy} et ecmq_z sont les écarts moyens quadratiques sur l'ensemble des points 3-D en prenant comme référence le premier essai (maximum de mesures, bandes transversales). Pour chaque essai, six itérations, pas d'inconnues de systématisme.

NB : pour Amiens 50 cm, la double bande transversale de droite a été éliminée : tant par TopAero que par BottomAero, elle conduit à de très graves anomalies.

Conclusions et remarques terminales

Comparaison des logiciels TopAero et BottomAero

Le tableau B.3.13 compare les deux logiciels sur des blocs correctement équipés. Les emq en xy et z sont estimées sur les appuis-réseau (en fin de compensation le point 3-D correspondant est calculé sans tenir compte des coordonnées terrain). Dans l'ensemble, les résultats concordent. Néanmoins, on constate une petite faiblesse de TopAero en planimétrie. D'ailleurs une sorte défaut de conception pour les fautes très grossières rend son emploi parfois difficile.

Tous les essais ont donc été faits à partir de fichiers de points-image issus de BottomAero qui réagit plus sainement aux erreurs grossières. Signalons aussi une autre source d'erreur (corrigée dans la version actuelle de BottomAero) : la multiplication des clichés (fort recouvrement inter-cliché et fort recouvrement interbande) fait qu'il arrive que des points, après mise hors course des très grosses fautes, se retrouvent, par exemple, sur deux ou trois clichés en rapport b/h extrêmement faible, d'où des déterminations fantaisistes (dans BottomAero, on exige l'existence d'au moins un rapport b/h > 0,15, sinon le point est inactivé).

GPS absolu

En l'absence d'appuis-sol on obtient la planimétrie exacte, si les bandes sont volées en sens alterné. Par contre, il subsiste un biais en z. En fait, on devrait pouvoir résoudre ce problème : est-ce l'étalement de la chambre ou l'Inclinaison de l'avion ? L'idéal, évidemment, serait de faire coïncider l'antenne avec la caméra. Ce n'est peut-être qu'une question de temps et d'argent.

La substitution du GPS absolu au GPS relatif ne présenterait de toute façon que des avantages :

- suppression des translations-bande dont on ne sait jamais quelle homogénéité elles doivent présenter, ce qui peut laisser passer des erreurs graves,
- inutilité des bandes transversales et
- réduction considérable du canevas d'appui (4-5 appuis figurant sur un nombre suffisant de clichés et pouvant se trouver même rapprochés, par exemple dans la zone centrale du bloc).

tableau B.3.13

Bloc	BottomAero		TopAero		échelle	échec points 3-D	Fautes points image
	EmqXY	emqZ	emqXY	emqZ			
Test argentique	0,28	0,31	0,29	0,34	1 : 30 000	0/459	3/1 410
SPCN 1507	0,32	0,29	0,43	0,27	1 : 25 000	1/1 278	18/5 060
Antifer	0,40	0,47	0,75	0,40	1 : 30 000	0/4 084	29/4 084
					pixel		
Amiens 25cm (2001)	0,14	0,16	0,20	0,23	25 cm	470/10 350	3 640/54 000
Amiens 31cm (2001)	0,21	0,21	0,29	0,22	31 cm	216/8 200	1 080/25 000
Amiens 50cm (2001)	0,97	0,35	1,00	0,45	50 cm	36/4 800	2 000/70 000

Les trois premiers blocs sont argentiques, les autres sont numériques.

Mode inertiel

Les précisions annoncées par les constructeurs semblent insuffisantes : il faut une précision pour les trois composantes angulaires qui soit comparable à celle du rayon perspectif (rapport emq pointé/ focale : par exemple, pour une caméra numérique de focale de 51 mm, un pixel de 9 μm , une emq de pointé de 0,33 pixel il faudrait une emq de 0,06 mrd. Pour une caméra argentique de focale de 150 mm et pour une emq de pointé de 5 μm , il faudrait une emq de 0,035 mrd). On en paraît loin. Il faudrait, d'autre part, pour qu'on puisse se passer totalement de mesures-cliché être assuré de l'inexistence de tout biais.

Mode avant-arrière

Aucun problème : on double la surface utile par couple et on améliore l'exactitude en z.

Bandes transversales

Elles semblent sans aucun intérêt pour un équipement en GPS absolu, avec un équipement en GPS relatif sont très intéressantes en cas de faible canevas d'appui. Deux appuis dans chaque coin du bloc semblent alors largement suffire.

Systématisme

Il est indiscutablement présent, simplement, il ne se manifeste pas pour les points 3-D se trouvant sur de nombreux clichés.

Type de projection

Sa méconnaissance est parfois sans influence sur les résultats quand on opère en GPS relatif et qu'on exploite des données cartographiques. Il n'en est pas de même si on opère en GPS absolu, où il faut impérativement en tenir compte : par exemple prendre du Lambert 93 quand il s'agit d'un autre Lambert donne de très mauvais résultats. Mais même en GPS relatif, sa méconnaissance entraîne des mécomptes : le laboratoire MATIS exploite ainsi des données euclidiennes : or, ces données ne sont rigoureusement euclidiennes que si on tient compte dans les calculs d'aéro-triangulation du type de projection.

Signalons que les données d'orientation des faisceaux peuvent être données en cartographique et permettent alors d'évacuer le problème de la projection dans les opérations aval.

Un relèvement dans l'espace est effectué en fin de compensation pour chaque cliché sur tous les points compensés cartographiques. Le calcul montre que cela n'entraîne aucune erreur sensible si le relief n'est pas trop fort sur un couple (il faut $\Delta h < R\sigma/F$ ou R est le rayon terrestre, σ est l'emq de pointé et F est le format, par exemple : pour un format 4 096 x 4 096, un pixel de 9 μm , il faut $\Delta h < 650$ m ; pour un cliché argentique de format 200 mm, avec $\sigma = 5$ μm , il faut $\Delta h < 150$ m).

Nombre de points-image

Trente points-image par cliché suffisent largement. Le taux de fautes de mesures des coordonnées-image dans le processus actuel de mesure par corrélation automatique ne dépasse pas 7%. A quoi bon en prendre deux cents ou trois cents par cliché ?

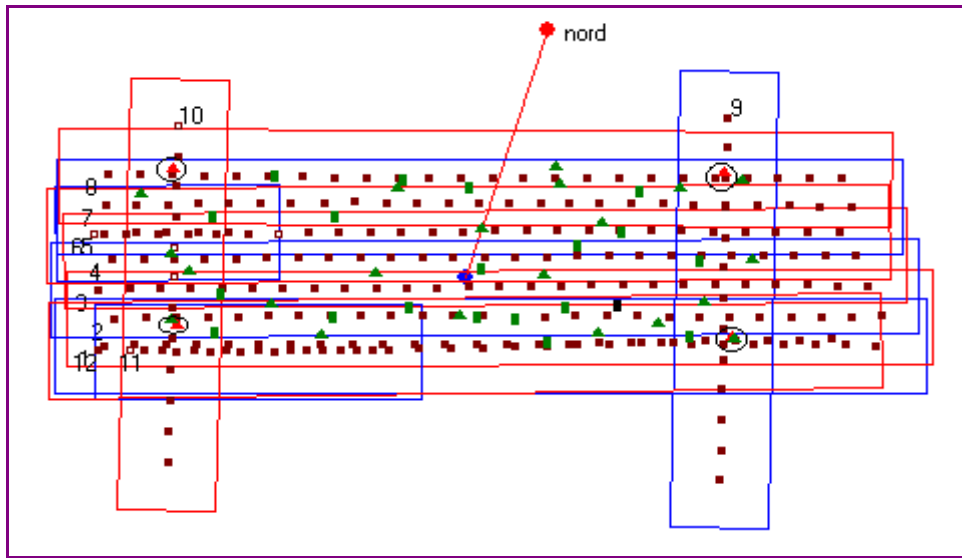
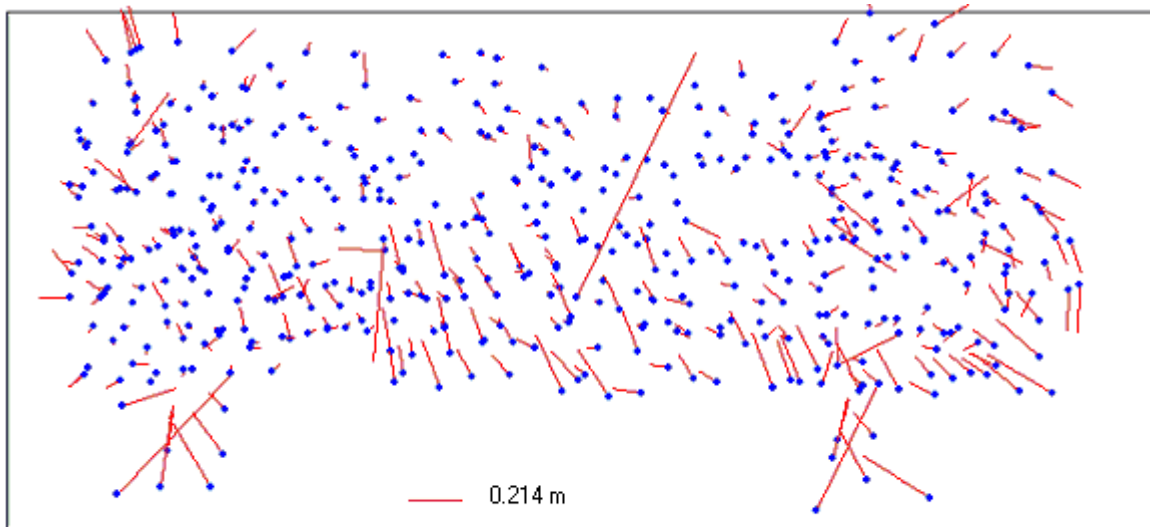
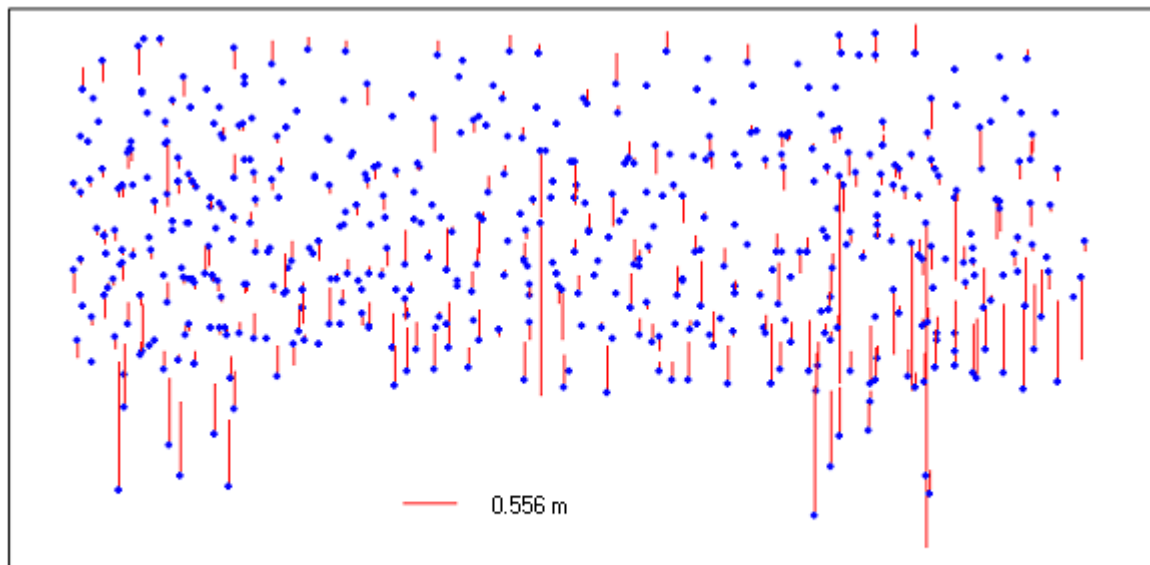


figure B.3.9 : Amiens 25 cm (15 appuis xyz, 20 appuis z).



Plani 10197 points de liaison
 Ecmq: 0.110; Ecart max: 1.772; HT: 574; ecmqSansHT= 0.071; biais en x: -0.02; en y: 0.025

figure B.3.9 bis : bloc avec inconnues de systématique - bloc sans. Écart planimétriques.



Alti 10197 points de liaison
 Ecmq: 0.311; Ecart max: 8.134; HT: 362; ecmqSansHT= 0.185; biais: 0.038

figure B.3.9 ter : bloc avec inconnues de systématique - bloc sans. Écart altimétriques.

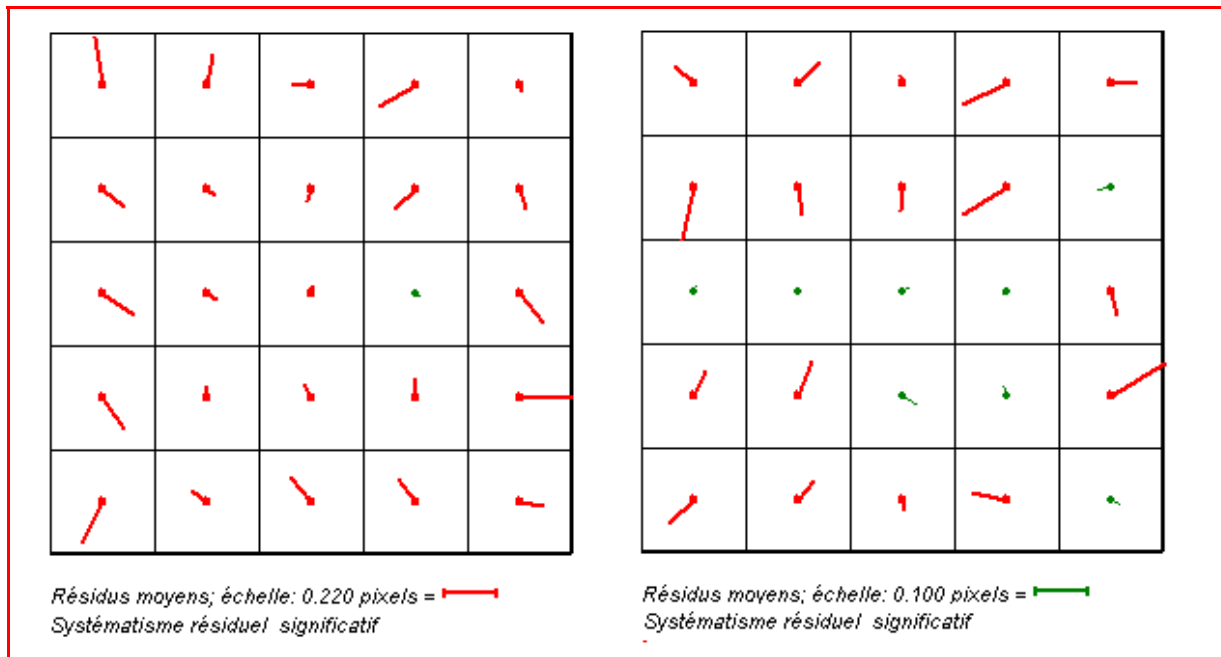


figure B.3.10 : Amiens 25 cm. Le systématisme résiduel avant introduction des inconnues de systématisme et après.

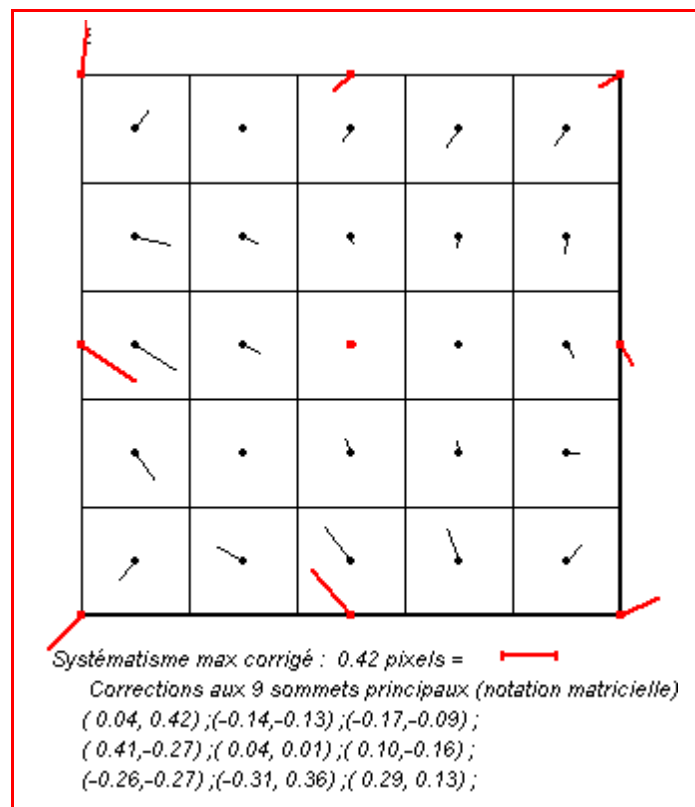


figure B.3.10 : Amiens 25 cm : le systématisme corrigé

Publication

[HOTTIER 01] Philippe Hottier : *Aérotriangulation analytique : BottomAero*, laboratoire MATIS, IGN-SR-01-0XX/C-RAP-PH, juin 2001.