L'utilisation des mesures saisies en vol en aérotriangulation

Claude Million

▶ **To cite this version:**

Claude Million. L'utilisation des mesures saisies en vol en aérotriangulation. Astrophysique [astro-ph]. Observatoire de Paris, 1991. Français. NNT : 1991OBSP0038 . tel-02153501

HAL Id: tel-02153501
https://hal.science/tel-02153501

Submitted on 12 Jun 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.

29 MARS 1994

OBSERVATOIRE DE PARIS

ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES

UNIVERSITÉ PARIS VI PIERRE ET MARIE CURIE

ASTRONOMIE STATISTIQUE ET DYNAMIQUE-GÉODÉSIE

SPÉCIALITÉ GÉODÉSIE

THÈSE DE DOCTORAT

(NOUVEAU RÉGIME)

OBSERVATOIRE DE PARIS 9375 BIBLIOTHEQUE

SUJET

L'UTILISATION DES MESURES SAISIES EN VOL EN AÉROTRIANGULATION

soutenue par

Mr Claude MILLION

JURY:

MM PAUL, Serge, Professeur, PRÉSIDENT

CHAPRONT, Jean, Professeur DR de Rech au C.N.R.S Paris

LAVERGNAT, Jacques, Professeur, CRPE

LEVALLOIS, Jean-Jacques, Ingénieur Général Géographe

KÖLBL, Otto, Professeur, Docteur, Ecole Polytechnique de LAUSANNE

EGELS, Yves, Ingénieur en Chef Géographe, Maitre de Thése

INVITÉ:

M HOTTIER, Philippe, Ingénieur en Chef Géographe

le 22 Janvier 1991

Je dédie ce travail à mes parents et
à M.Marcel ABRIBAT(1900-1972) Ancien
Directeur des Recherches des Laboratoires
Kodak (France)

22 Janvier 1991

1. RESUME EN ANGLAIS

THE USE OF ONBOARD SENSORS DATA IN AERIAL TRIANGULATION

ABSTRACT

During the short summers of 1986 and 1987 the Institut Geographique National of France conducted ten experiments to assess the capabilities of airborne measurements to reduce the need for ground control in aerial triangulation.

First, aerial triangulation with very dense ground control and check points was nevertheless used ,in all experiments, as a basis of comparison to evaluate the accuracy of airborne measurement data;when the degree of accuracy reached was considered sufficent, the second step was to use this data as observations in the adjustment with photogrammetric measurements and reduced ground control; when possible, the third step was to eliminate all ground control points, except one.

In all three steps the results were evaluated by computing the root mean error on the check points which were, for a part of them, inactivated control points.

The first two tests involved the combined use of statoscope and laser range measurements from a Falcon 20 flying over a wooded and hilly rural region of the center of France. Unfortunately the statoscope froze at the elevation of 16000 feet.

The precise identification of the point of the ground hit by the laser beam remained, at that time, an unsolved problem.

The accuracy of the range measured by the laser can be defined with a standard deviation of 1.80m and a bias which has to be computed as an unknown parameter in the adjustment. This bias was different in all flights involving the laser rangefinder.

The third and fourth tests were made in June 1986 over the South Suburbs of Amiens Township in the north of France with a SERCEL G.P.S receiver TR5 SB from an Aerocommander which is a low flying slow plane.The ground control, not targeted, was poor, sparse and old. Nevertheless the results were good enough to eliminate all ground control points which were used as check points. A fictitious control point was kept to comply with the fonctional model, which involved three translations.

In the adjustment the residuals from the G.P.S measurements were 0.40m for horizontal coordinates and for the elevations; after bias correction, the standard deviations of the discrepancies in check points were:

| 0.40m for horizontal coordinates and
| 1.20m for elevations

The fifth test duplicated the first and the second, over a smaller part, of the same rural region in the center of France, the laser rangefinder and the statoscope working together , simultaneously.

With the statoscope measurements alone and four(4) control points ,located in the area common to two strips,the adjustment residuals were 0.40m for elevations in control points, and 1.05m with statoscope measurements.
The mean square root of the discrepancies in the check points (129) was 0.75m.

With the combined measurements from the statoscope and the laser and the same four control points the adjustment residuals were:

| 0.30m in control points
| 0.60m with the statoscope
| 1.20m for laser ranges.

But 40% of the laser measurements were eliminated before the adjustment; their elimination during the adjustment was proved to be unreliable, because an important residual did not consistently appear in the incorrect point but, often, in neibourghing points.

The sixth and seventh experiments were conducted,in August 1987, with an airborne G.P.S receiver and two (2) different statoscopes to be tested from a Falcon 20 with a new receiving antennae maintaining a speed of 400mph at an elevation of 17,000 feet.
The two flights were made over the suburbs of Montpellier,a town in the south of France, on the Mediterranean Sea, and over Vichy a town in the center of France, both photoscales were 1:30000.
To stiffen the block ,two (2) N.S strips were flown over, crossing the four (4) E.W main strips .
The two different statoscope measurements, alone with four (4) ground control points, gave the same results as for the fifth test described before: for check points rms of the discrepancies from 0.60 to 0.70m.
The G.P.S coordinates, adjusted in combination with the photogrammetric measurements, without any ground control points, had the following adjustment residuals:

Montpellier	Vichy	
0.40m	0.25m	for horizontal coordinates
0.50m	0.35m	for elevation

After bias elimination, the standard errors of the discrepancies in the check points ,are:

0.70m	0.50m	for horizontal coordinates
0.50m	0.70m	for elevations

The statoscope and the G.P.S measurements have been both be used in the same adjustment in order to adjust a block in a lowered configuration of the satellites, when there is not a minimum of four satellites. In such a weak configuration, the G.P.S was expected to provide good horizontal coordinates, and the statoscope the elevations.

Two more flights were made over Manosque and over Albertville, after Montpellier and Vichy respectively, with only three satellites in sight. The adjustment was made, the block being controlled by one point of which only the horizontal coordinates were known, and by five known elevations points; the residuals were:

Manosque	Albertville	
1,00m	5,00m	For horizontal coordinates
1,35m	1,00m	For elevations

After bias elimination the standard errors of the the discrepencies in the check points were:

1,40m	3,90m	For horizontal coordinates
1,10m	1,05m	For elevations

The HDOP was bad for Manosque and very bad for Albertville but the elevations remained as good as they were in the experiments involving the statoscope and terrain control points.

2. REMERCIEMENTS.

La présente étude, qui a été menée dans un des Services de l'Institut Géographique National, a entrainé la mise en oeuvre de moyens matériels considérables et la mobilisation de beaucoup de bonnes volontés, ainsi qu'une gêne à la production, même si on a essayé de la rendre aussi légère que possible.

Les résultats attendus étaient essentiellement pratiques.

En plus de l'E.N.S.G, de l'Observatoire de PARIS, de l'Université Pierre et Marie CURIE, qui ont fourni le cadre administratif dans lequel elle a pu être réalisée, les Services de l'I.G.N directement concernés, étaient le Service de Photogrammétrie (S.PH), devenu Service de Topographie Numérique (S.T.N), et le Service des Activités Aériennes.

Je tiens à remercier plus particulièrement:

-Au S.T.N : M.EGELS, maitre de thèse, qui a dirigé ce travail.

M.PRESSENSE, qui a accepté que cette étude soit faite dans le service qu'il dirigeait.

M.PINSON, qui lui a succédé à la tête du S.PH puis du S.T.N.

-A l'E.N.S.G.: M.HOTTIER, Professeur de Photogrammétrie et d'Analyse Numérique, qui m'a aidé sur des sujets particulièrement difficiles et transmis des documents propres à me guider dans mon travail.

- Au S.A.A : M.BROSSIER, qui était responsable des essais sur les capteurs dans ce Service, qui a été l'initiateur des essais G.P.S.sur AMIENS, avec lequel j'ai beaucoup travaillé de façon fort sympathique, et qui a présenté notre contribution commune sur les essais de G.P.S aéroporté, au Congrès de KYOTO.

Je voudrais remercier plus généralement:

M.J.C.DAYET, coauteur de "FAISCEAUX"

-Au S.T.N.: Melle VEILLET
MM MEYER, MOISSET, GRATEAU, SEC , BERNARD, FRESNEY, LASCAUX, et les opérateurs et les opératrices qui ont préparé les blocs que j'ai utilisés, et fait les mesures sur les clichés, et ce, parfois, dans des conditions difficiles.

-Au S.A.A : M.REYNES, qui a succédé à M.BROSSIER dans ses fonctions.

-A la Société SERCEL : MM. BONIN, GOUNON et NARD qui m'ont transmis les calculs et les documents cités dans le texte.

-Au S.G.N : MM. P.WILLIS, PREVOT et CASSOU.

L'UTILISATION DES MESURES SAISIES A BORD EN AEROTRIANGULATION

3. PREAMBULE.

Ce mémoire est partagé en trois parties: des considérations assez générales, le texte lui-même et les annexes dans lesquelles les développements, qui tout en étant directement liés au sujet, avaient tendance à en allonger le cours, sans que leur intérêt reste égal pour tous, ont été reportés .

La présentation des algorithmes, au demeurant fort peu nombreux, s'est faite suivant un choix personnel sacrifiant, à la fois, aux habitudes de l'E.N.S.G., et à celles des auteurs étrangers les plus nombreux [1 SHAMOS & PREPARATA].

Les pages des figures n'ont pas été numérotées, elles sont placées près de l'endroit du texte où elles sont citées, la notation des chapitres et des paragraphes est faite par numérotation décimale.

Un index des textes cités dans ce mémoire et repérés entre crochets [ ] est donné en fin de l'exposé lui-même.

Le sujet traîté étant très spécialisé il a semblé nécessaire de développer certains détails qui ne sont bien connus que des quelques personnes, peu nombreuses, qui les emploient quotidiennement, plus pour définir clairement le vocabulaire employé, que pour aller au fond des problèmes . On a fait de même

pour les sujets n'ayant pas fait l'objet de publications, il est évident que leur présentation n'aura pas la qualité de ce que leurs auteurs auraient pu faire.

Les notations sont celles les plus communément adoptées dans les ouvrages français et, parfois, anglo-saxons; on a reservé les caractères **gras** aux matrices et aux vecteurs.

En raison des habitudes prises pour les notations il n'a pas été possible de respecter la convention, pourtant bien agréable pour le lecteur, qui réserve les minuscules aux vecteurs et les majuscules aux matrices .

On a utilisé des capteurs de pression comme des statoscopes et, pour cela, considéré que les deux termes étaient synonymes.

La nécessité de développer des détails afin d'élargir l'audience de ce mémoire a eu pour contrepartie de présenter le défaut de diluer le travail qui était strictement personnel dans les rappels de choses connues des spécialistes, dans les citations de travaux parallèles d'auteurs et dans l'exposé détaillé de travaux auxquels on a fait des emprunts et qui n'avaient, hélas , pas fait l'objet de publications pour avoir atteint un auditoire assez large (Notes techniques, notes internes....etc) l'ensemble ainsi créé pourrait rendre parfois difficile la distinction entre ce qui est original et ce qui ne l'est pas.

La présentation de ce mémoire est articulée autour des essais réalisés sur dix (10) chantiers qui sont une suite d'expériences s'appuyant les unes sur les autres, une description différente de l'ordre chronologique, telle qu'elle s'est imposée est basée sur les capteurs eux-mêmes et les essais dont ils ont fait l'objet, mais aussi les associations de capteurs. On ne retrouvera l'ordre chronologique d'execution des essai que dans les annexes.

Les errements des premiers essais devraient être appréciés avec indulgence; ceux de 1986, notamment les vols d'Amiens I et II, Argenton-Bourganeuf et Magnac- Laval, expliquent les décisions prises en 1987, présentés autrement ils ne reflèteraient que l'ignorance dans laquelle on était au début de cette étude.

Notamment on soulignera plus loin qu'il est apparu nécessaire d'utiliser des blocs homogènes lorsqu'on veut les appuyer sur des mesures aéroportées, ceci n'est devenu évident qu'après avoir constaté que les blocs observés en 1986 manquaient de rigidité transversale et que les résultats qu'ils donnaient en altimétrie n'étaient pas satisfaisants mais que la précision des mesures aéroportées ne pouvait pas être mise en cause. Ces défauts étaient la conséquence du choix des paramétres significatifs des modèles des mesures aéroportées qui étaient, eux-mêmes, la conséquence du choix des modèles stochastiques réduits à l'entrée d'un écart-type unique pour toutes les mesures, imposé par la structure même des programmmes de compensation par les moindres carrés. Rien de tout cela ne pouvait être imaginé en dehors de l'expérimentation.

Pour cette raison tous les chantiers observés en 1986 sont des blocs normaux n'ayant aucune rigidité transversale ce qui a eu pour conséquence de minimiser la portée des résultats qu'ils affichent en altimétrie.

Les nombreuses publications qui ont fait suite au congrès de l'I.S.P.R.S de KYOTO en Juillet 1988 ont apporté des informations inédites sur le sujet traité, elles ne pouvaient non plus être ignorées surtout dans la conclusion, c'est pourquoi on a bien indiqué les références bibliographique des auteurs même lorsque le document n'était pas encore publié il ne peut subsister aucun doute sur le fait qu'il s'agit de citations et non de la tentative d'annexer des travaux auxquels on n'a pas participé.

Il faut, tout d'abord, bien préciser, ce qui sera rappelé dans le projet de recherche, que le travail consistait à utiliser les mesures faites à bord d'un avion pour appuyer un bloc d'aérotriangulation, et non de les faire.

Le travail a été conduit dans le cadre d'un service de production les résultats attendus étaient essentiellement pratiques.

Le choix des mesures qui devaient être exploitées avait été fait au début de ce travail, le projet initial ne prévoyait que l'exploitation des mesures faites à l'aide du matériel A.P.R modifié pour saisir des mesures ponctuelles qui seraient entrées directement dans les calculs d'aérotriangulation et non plus pour relever des profils continus compensés séparément pour être introduits dans le bloc comme des lignes de points d'appui traditionnels. Mais fort heureusement il avait été prévu que l'auteur resterait à la disposition des responsables de la saisie des mesures pour tout autre tentative visant à en exploiter d'autres qui n'étaient pas encore définies, car sur les deux premiers chantiers qui devaient constituer la matière expérimentale principale de cette étude le statoscope embarqué n'avait pas fonctionné et l'auteur avait montré par des simulations, qu'en l'état, les mesures des hauteurs des sommets perspectifs mesurées par le télémétre laser ne permettaient pas d'appuyer un bloc.

En 1986 il n'était pas certain que la réception des signaux NAVSTAR/G.P.S soit possible à bord d'un mobile très rapide(vitesse de croisière 800 km/h) tel que l'avion photographe MYSTERE 20 utilisé à l'I.G.N. L'expérience française se réduisait à celle acquise par la SERCEL l'année précédente sur son récepteur à finalités Géodésiques monté sur un bateau.

L'expérience d'AMIENS en 1986 avait montré, d'abord, que toutes les préventions étaient infondées et que les obstacles physiques qu'on croyait devoir empêcher la réception n'existaient pas.

Ces deux vols ont permis, en outre, de roder la méthode de travail utilisée l'année suivante en 1987.

De même, les deux essais manqués d'utilisation combinée du télémètre laser et d'un statoscope avaient permis de faire le choix des capteurs de pression plus stables, ce qui a facilité la reprise, sur une surface beaucoup plus réduite, de l'expérience initiale.Il convient de noter que cet essai était le premier du genre en FRANCE, laquelle avait été largement distancée dans ce domaine par les Allemands et les Canadiens

Par la suite l'intérêt s'est plus porté sur l'utilisation du récepteur de signaux NAVSTAR/G.P.S car, par ailleurs, l'expérience faite sur l'utilisation des mesures des capteurs de pression semblait suffisamment concluante pour passer

directement à un chantier de production afin d'économiser des points d'appui, qui de toutes les façons ne pouvaient pas être déterminés par des procédés traditionnels dans la forêt amazonienne de la GUYANE.

En 1987 les essais NAVSTAR/G.P.S et capteurs de pression combinés ont été effectués sur des blocs rendus homogènes par la présence de bandes transversales permettant la transmission des translations qui, surtout pour G.P.S, sont des inconnues liées aux bandes, en raison des interruptions de réception dont on ne pouvait pas anticiper l'existence sans avoir fait les essais de 1986 à AMIENS.

Les essais de 1987 représentent maintenant ce qui pourrait être fait sur des chantiers de production, par contre ceux d'AMIENS n'en sont que la préfiguration, car les blocs sont normaux, donc souples transversalement.

Les ANNEXES contiennent la description des missions de prises de vues utilisées pour faire les essais et les travaux de préparation des essais, notamment les calculs des blocs servant d'éléments de comparaison aux mêmes calculs des blocs utilisant les mesures aéroportées.

Il n'a pas été possible de trouver de renvoi possible à la littérature sur la manière de traiter les points d'impact laser: Il s'agit donc d'un travail original qui a le mérite de ne rien cacher des défauts du procédé, il a été exposé dans le texte principal. En outre on traite pour la première fois du report des points entre clichés et entre bandes on s'est étendu sur les erreurs de transfert et on a donné sur ce point un avis opposé à l'opinion courante.

On trouvera, aussi, en ANNEXE une description du programme FAISCEAUX de l'I.G.N dont on aurait pu faire l'économie si elle avait existé dans la littérature technique, mais les contributions des mesures laser, statoscopes, ou G.P.S, qui, elles, sont originales, s'insèrent dans le tissu de ce programme, on a montré, en outre que malgré les contributions des mesures touchant les points (laser) il reste néanmoins possible d'éliminer leurs inconnues par des résolutions partielles, ce qui permet d'économiser la place en mémoire; ceci n'était pas du tout certain au début de ce travail, on était même parti dans une direction opposée.

Les calculs d'aérotriangulation placés en annexe correspondent à des pratiques courantes leur résultats sont répétés, en tant que de besoin, dans le texte principal pour servir de bases de comparaison aux mêmes calculs utilisant, cette fois, les mesures aéroportées, par contre le choix des modèles des mesures aéroportées, qui est un élément essentiel de ce travail est associé aux mesures du capteur correspondant dans le texte principal, c'est même celui qui a fait l'objet de tous nos soins.

Les résultats trouvés, sans être contradictoires avec ce qui avait été publié, apportent un éclairage neuf, même pour les mesures laser pour lesquelles on a été amené à faire des citations détaillées des travaux faits à l'étanger pour montrer que la technologie des mesures employées n'était,peut être, pas toujours optimale en France.

Même pour les mesures statoscope, pourtant déjà tant expérimentées par lés Allemands et les Canadiens, on a pu

apporter un point de vue nouveau sur la modèlisation et montré que la pente de l'isobare n'était pas forcémment une réalité présente dans tous les vols.

On a indiqué comment on était parvenu à faire la différence entre les blocs normaux et les blocs homogènes et on a donné leur définition. Le manque de rigidité transversale du bloc normal n'est pas une nouveauté et ces défauts pour les déterminations altimétriques étaient bien connues, mais nul part on a trouvé mentionné que l'utilisation des blocs homogènes devenait indispensable en aérotriangulation appuyées sur des mesures saisies à bord, d'où les erreurs qu'on avaient commises la première année, au cours de laquelle tous les vols concernaient des blocs normaux. Evidemment les descriptions des simulations faites sur les blocs pour apprécier leurs rigidités transversales sont un peu longues elles étaient nécessaire pour bien prouver qu'il était vraiment indispensable d'observer des blocs homogènes. On a appris, par la suite que d'illustres devanciers n'étaient jamais parvenus, en France, à convaincre les aviateurs de l'intérêt des bandes transversales, la littérature ne porte pas trace de l'echo de ces débats. Toutefois les services étrangers, notamment la N.O.A.A, utilisaient, en routine, des blocs homogènes pour leurs travaux traditionnels d'aérotriangulation en adoptant un recouvrement transversal de 60%, sans avoir, apparemment, reussi à faire école, en France en raison de la difficulté des vols et du coût des opérations; on nous a montré que l'utilisation de blocs homogènes était utilisée de façon tout à fait courante en Allemagne, en Suisse et aux Etats-Unis, même pour des opérations traditionnelles appuyées de façon classique sur des points au sol, sans que l'argument économique soit un élément de rejet.

On a remarqué, en outre, que les simulations ne donnent rien d'autre que des résultats très connus, et que ceux-ci peuvent être représentés par des formules très simples et même simplistes largement suffisantes. On a insisté sur l'effet d'autocontrainte de courbure des bandes d'un bloc dont on sentait les effets par les résidus élevés sur les points de liaison entre bandes qu'on attribuait à tort, selon nous, à des difficultés de report. Cette notion d'autocorrection, en planimétrie seulement, des erreurs sytématiques des clichés n'apparaissait pas dans la littérature connue de l'auteur.

On a abordé un domaine qui, à lui seul, pourrait constituer un sujet de thèse: Le problème de la pondération des mesures hétérogènes qui se pose aussi en géodésie où on mélange des mesures de longueurs et des mesures d'angles, des mesures satellitaires et des mesures terrestres, problème souvent résolu en donnant aux mesures terrestres la valeur d'une base de comparaison.

Il semble que le même problème va se poser en spatiotriangulation où les divergences actuelles entre les modèles proposés par les auteurs ne masquent que l'ignorance dans laquelle on reste dans le choix de poids appropriés à donner aux différentes mesures, aggravé par les corrélations élevées existant entre certaines d'entre elles. Si les approches connues sont très prometteuses elles ne permettent pas encore de prendre en compte la présence inévitable de systématismes souvent prépondérants.

La pièce maîtresse de ce travail est constituée par les différents chapitres traitant, chacun, de l'utilisation d'un capteur ou d'associations de capteurs sur plusieurs chantiers, puisqu'ils fournissent en gros les résultats les plus significatifs obtenus.

Pour le détail des résultats obtenus sur les chantiers utilsés dans plusieurs chapitres différents on se reportera en ANNEXE.

On avait préféré privilégier le nombre des chantiers traîtés, exclusivement pour donner plus d'assise et de généralité aux modèles fonctionnels et stochastiques proposés.

C'était, en effet, l'objectif central de ce travail il semble que les propositions qu'on fera constitueront l'essentiel de l'apport significatif réalisé.

L'absence, qu'on pourra remarquer, de certain procédés de navigation qui n'ont pas été utilisés s'explique soit par le coût des matériels comparé aux performances qu'on pouvait en attendre en 1986, pour les centrales de navigation par inertie comme premier exemple, soit parce que l'I.G.N avait déjà expérimenté le matériel qu'on aurait pu utiliser, pour le procédé TRIDENT de Thomson-CSF essayé en 1985 comme second exemple.

Le S.H.O.M. devait reprendre, en 1986, les essais de ce procédé en l'aidant des mesures d'un capteur de pression CROUZET 44.

Par la suite on s'est aperçu que les modèles stochastiques des mesures des positions des sommets données par les centrales de navigation par inertie étaient les mêmes, ou comparables à ceux du bloc, alors que les mesures des attitudes n'auraient pas les mêmes défauts. On reviendra sur ce point en conclusion.

4. LISTE DES SIGLES UTILISES

S.H.O.M

Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

N.O.A.A

National Oceanic and Atmospheric Administration: Service américain correspondant à son homologues français qui vient d'être cité mais avec de plus larges attributions.

S.A.A

Service des activités aériennes de l'I.G.N

S.PH.

Jusqu'en 1987 service de photogrammétrie à l'I.G.N dans le cadre duquel a commencé cette recherche.

S.T.N

Service de Topographie Numérique de l'I.G.N

SERCEL

Société d'Etudes et de Recherches en Electronique qui a développé le récepteur expérimental TRS 5B des signaux de la constellation NAVSTAR/G.P.S utilisé dans cette étude.

G.D.O.P

Geometric Dilution of Precision:

Effet de la géométrie de l'intersection des mesures de distances des satellites au point sur sa précision: Elément de la précision de la détermination de la position d'un point ne dépendant que de la géométrie de la figure, indépendant de la précision de la mesure, il faut multiplier G.D.O.P par la précision de la mesure pour obtenir la précision de la détermination du point.

I.S.P.R.S

International Society of Photogrammetry and Remote Sensing : Société Internationale de Photogrammétrie et de Télé détection

T.P.F.R

Triangulation par plaques à fentes radiales; ce procédé qui consiste à matérialiser l'intersection du plan contenant le rayon reliant le point triangulé et l'axe de la chambre avec le plan du cliché par une fente découpée dans une feuille de rhodoïd et à assembler ces feuilles sur un plan en les appuyant sur des points connus, correspond au terme Anglo-Saxon "Templet", c'est-à-dire gabarit.

A.P.R

Airborne Profile Recorder: Enregistreur de profils aéroporté; parfois employé dans le sens d'enregistrement à bord d'un avion de profils du terrain survolé. L'appareillage comporte un statoscope associé à un radar ou à un appareil de mesure des hauteurs laser.

NAVSTAR/G.P.S.

Global Positioning System/Navigation System with Time and Ranging.

Traduit par les Canadiens francophones par Système de Positionnement Global

Système mondial de localisation par satellites.

Système à finalités militaires pour définir, en temps réel, la position d'un récepteur mobile ou fixe en tout point du globe, avec une précision inégalée. En raison de l'intérêt stratégique de ce système une partie des signaux qu'émettent les satellites sans être intérrogés est codée, il est même prévu qu'ils puissent être "bruités" à l'avenir, c'est-à-dire dégradés. L'utilisation en différé par les civils est possible en captant les signaux non codés d'une définition plus grossière, et en leur associant ce qui ne peut pas être codé, c'est-à-dire la phase de l'onde porteuse indépendamment de tout signal. Les mesures faites sur l'onde porteuse seule sont alors ambiguës, en ce sens qu'on ne mesure la distance du récepteur au satellite qu'à un nombre entier près, inconnu, de longueurs d'onde. Sur un mobile, comme un avion photographe, on utilise deux méthodes, soit la trajectographie qui permet d'obtenir les positions après un léger différé, soit les procédés cinématiques qui sont plus précis mais qui mettent en oeuvre des moyens informatiques de calcul de l'ensemble des observations plus puissants.

La constellation finale prévue comprendra 24 ou 26 satellites, c'est-à-dire 6 satellites décalés de 60° placés sur trois plans orbitaux décalés eux aussi de 60°, et un satellite de rechange par plan orbital, et quelques satellites supplémentaires. Actuellement 9 satellites sont opérationnels, un est en panne, mais émet encore si bien que l'onde porteuse peut être utilisée, pendant les travaux qu'on va décrire seuls six satellites étaient utilisables, deux satellites ont été lancés le 14 Février 1989 par une fusée THOR Delta 2, un autre en Avril.

L'utilisation actuel de G.P.S en dehors des E.U n'était possible que deux heures par jour et souvent de nuit! les chose se sont, très récemment, améliorées.

W.G.S.72 et 84

Système de référence géodésique mondial: Par conséquent définition d'un ellipsoïde de référence mondial et fixation de quelques constantes physiques permettant de prévoir la position des satellites, sur lequel sont calculées les positions données par G.P.S, ce système mondial diffère des systèmes régionaux qui représentent mieux le géoïde localement, c'est pourquoi il est nécessaire, dans les utilisations cartographiques nationales, de passer d'un système de référence mondial W.G.S à l'ellipsoïde local sur lequel sont rapportées les mesures géodésiques traditionnelles. Pour calculer les altitudes à partir de mesures G.P.S qui donnent des hauteurs au-dessus de l'ellipsoïde W.G.S. puis de l'ellipsoïde régional il est nécessaire de connaître en tout point la cote du géoïde par rapport au système de référence.

5. GENERALITES, CADRE DE L'ETUDE, CAPTEURS ET LOGICIEL

En embarquant une chambre métrique à bord d'aéronefs: ballons, puis avions vers 1920 [2 OLLIVIER] [1], on avait perdu la possibilité de déterminer, directement au sol, la position précise du point de vue, par les procédés traditionnels de la topographie ou de la géodésie dites, maintenant, bidimensionnelles.

La position du point de vue devait donc être déterminée par relèvement sur des points connus au sol; plus précisément il s'agissait de déterminer la position du couple dans l'espace et non du cliché isolé.

Les mesures des coordonnées images des points connus se faisaient, et se font toujours, par observation stéréoscopique sur, au moins, une paire de clichés, ou par observation monoscopique de cibles balisées sur, au moins, deux clichés formant un couple.

La photogrammétrie aérienne a longtemps utilisé la méthode de mise en place des sommets points de vue par couples isolés, c'est-à-dire couple par couple, par relèvement, dans l'espace, sur des points déterminés au sol par les moyens traditionnels de la topographie et de la géodésie, ces points étant situés dans la partie commune couverte par les deux photographies formant le couple, pour, ensuite restituer les position des points inconnus. La restitution devenait, en somme, une sorte d'interpolation entre des points connus. La mise en position relative de deux clichés d'un couple stéréoscopique crée une liaison entre eux qui ne nécessite l'intervention d'aucun point au sol; le couple doit, ensuite, être mis à l'échelle et en place, dans le référentiel de la carte par une transformation de similitude.

Le nombre minimum de points nécessaire pour cette mise en place était celui d'une similitude dans l'espace $]R^3$, c'est- à-dire, pour des clichés dont l'axe est presque vertical de la photogrammétrie aérienne, soit deux points connus dans leurs trois coordonnées, et un point connu en altimétrie, soit trois connus en altimétrie et deux points connus en planimétrie.

Néanmoins, en

---

[1] Cet ouvrage de 1929 rédigé en 1927 ne traite pas encore d'aérophotogrammétrie, mais cite des réalisations datant des années 20, bien sûr on avait, depuis Nadar, déjà pris beaucoup de photographies aériennes, surtout pendant la Première Guerre Mondiale.

raison des imperfections mécaniques des appareils de restitution analogiques, et des erreurs de calage de la position relative des deux clichés formant le couple, dûes au imperfections des optiques, il fallait disposer de cinq (5) à six (6) points par couple, afin de pallier ces inconvénients, et de se réserver les contrôles indispensables .

Le coût global de l'opération cartographique était donc largement dominé par celui des travaux de terrain.

Dès 1930, mais surtout après la Seconde Guerre Mondiale, il n'avait pas échappé aux photogrammètres que la mise en place relative de deux photographies stéréoscopiques pouvait se faire sans l'intervention de points connus au sol et que, par conséquent, il était possible d'enchaîner la seconde photographie du premier couple, qui devenait la première du second couple, au troisième cliché, et ainsi de suite jusqu'à la fin de la bande de vol, et qu'il suffisait, du moins en principe, d'appuyer le premier et le dernier couple de chaque bande sur des points déterminés au sol, par les procédés classiques, pour fixer la bande dans sa totalité, c'était le principe de l'aérocheminement.

Pour passer à la conception actuelle du bloc photogrammétrique indépendant, ou presque, des réseaux de points d'appui au sol, il suffisait dc relier les bandes entre elles. Sans les imperfections,mécaniques et optiques, des appareils, ces idées auraient reçu, très rapidement, des applications qui n'ont vu le jour que très récemment grâce aux moyens de calculs de compensation par blocs.

Il était normal que les premières applications se soient faites en se servant de la photographie aérienne d'axe quasi-vertical, comme d'un goniomètre en triangulation classique, bidimensionnelle, pour déterminer les coordonnées planimétriques seulement de points inconnus à cause de la simplification des relations géométriques du faisceau spatial, à l'aide de méthodes analogiques (T.P.F.R :triangulation par fentes radiales), en matérialisant les"visées" par des fentes découpées dans des gabarits formés de feuilles de plastique rigides et transparentes, et les points par des plots insérés dans la surface commune à plusieurs fentes.

Ce procédé, plus économique que ceux qui l'ont suivi, est toujours utilisé pour déterminer par voie photographique, des points de calage au sol, en planimétrie seulement, ces mesures sont complètées, en tant que de besoin, par des relevés expédiés des altitudes faits, généralement, au sol, avec des moyens tel que les baromètres. On a cru, plus tard, lui trouver un perfectionnement en mesurant simplement les angles sur les photographies, à l'aide d'un goniomètre et en calculant la triangulation, comme on aurait procédé avec des mesures faites au sol, à l'aide d'un théodolite .

C'est la liaison par des points communs à deux bandes adjacentes de photographies, et des chaînes des triangles qu'elles permettaient de mesurer qui a amené, tout naturellement, à la conception du bloc d'aérotriangulation, composé de plusieurs bandes contiguës, et appuyé sur quelques points connus au sol.

La détermination de points planimétriques par voie photogrammétrique a été employée ,sur une grande échelle,par le Service du Cadastre pour la réfection des documents cadastraux des zones rurales de faible ou même de moyenne valeur en France

métropolitaine, et pour la confection du cadastre Outre-Mer.

Ce procédé a été abandonné pour la confection du cadastre, moins en raison de ses imperfections propres, que de celles des moyens de restitution de la planimétrie qui lui étaient associés. Il ne reçoit plus, en cartographie classique, que des applications sous forme de T.P.F.R associées à des mesures d'altitudes au sol, à l'aide de baromètres, et à la méthode décrite plus loin sous le sigle d'A.P.R.

De fait, on sait maintenant, après trente années d'expérience, qu'il n'était pas difficile de caler, avec succès, un bloc d'aérotriangulation en planimétrie, et ce, avec une assez grande précision, car un bloc normal est très rigide dans son plan; il n'en était pas de même en altimètrie, comme on pourra le voir.

Les progrès ultérieurs se sont enchaînés logiquement: au lieu de mesurer les angles sur une photographie à l'aide d'un goniomètre il était plus simple de relever les coordonnées images à l'aide d'un comparateur, en s'aidant, ou non de l'effet stéréoscopique, pour être sûr d'identifier correctement des points naturels homologues sur les deux photographies formant le couple.

Les progrès tout à fait considérables faits sur les optiques de prises de vues, et l'amélioration parallèle des moyens de calcul numériques permettaient d'envisager de calculer les blocs d'aérotriangulation dans l'espace à trois dimensions d'autant plus facilement que, par la connaissance de la distorsion résiduelle en chaque point du champ de l'image, il était possible d'apporter une correction aux mesures brûtes faites sur les photographies. On aurait pu ainsi approcher de la perfection s'il était resté possible économiquement de continuer à prendre des photographies aériennes sur des plaques de verre traîtées optiquement.

La cartographie est une activité industrielle, et les impératifs de production mais surtout les possibilités de multipler par dix ou vingt les capacités d'archivage des clichés ont entraîné l'adoption de supports plus minces et plus lègers, mais beaucoup moins stables que le verre. Ils représentaient toutefois un progrès considérable sur les supports souples qui les avaient précédés et qui n'avaient pas pu être employés, en photogrammètrie, en raison de leur manque de stabilité dimensionnelle.

5.1. L'AEROTRIANGULATION

Entre les travaux classiques de topographie ou de géodésie pour la stéréopréparation et la restitution cartographique proprement dite en vue du dessin du document graphique, qui servira à l'élaboration de la carte, s'était glissée la fonction de mesure et de calcul du réseau photogrammètrique seul, c'est-à-dire indépendemment des mesures au sol. Les mesures de ce réseau avaient pour objectif essentiel d'économiser les travaux sur le terrain qui sont des opérations réputées longues et coûteuses.

L'aérotriangulation est une technique de la photogrammétrie qui consiste à estimer les coordonnées d'un très grand nombre de points au sol, à partir de mesures faites sur des

clichés aériens, et d'un petit nombre de mesures externes, classiquement les coordonnées d'un petit nombre de points au sol déterminés par des moyens géodésiques traditionnels.

Le réseau calculé à l'aide de mesures purement photographiques présente, toutefois, deux graves défauts:

-Le premier est inhérent à l'enchaînement de l'orientation relative des photographies, l'une après l'autre, qui est la cause du phénomène décrit comme "la double sommation des erreurs accidentelles". Ce phénomène est bien connu du topographe puisqu'il est la généralisation, à l'espace à trois dimensions, de la transmission des erreurs d'orientation des cheminements polygonaux qu'il rencontre dans ses calculs dans le plan: l'erreur d'orientation du premier côté se répercutant sur tous ceux qui le suivent, d'où le terme, peu éclairant, de double sommation, alors que c'est une somme de moments, produit d'une erreur angulaire croissant comme la racine carrée du nombre des sommets par un bras de levier diminuant linéairement de longueur.

-Le second, plus grave, provient des systématismes résiduels sur les mesures des coordonnées-images des points, et même sur les positions des images sur leur support, il entraîne une déformation, elle aussi systématique, du réseau photogrammètrique, qui impose, pour la corriger, de disposer de points d'appui au sol, dans le corps du bloc dont on voudrait, justement, faire l'économie.

On ne saurait passer sous silence l'évolution considérable des moyens de calcul qu'ont entraîné les progrès fait sur les ordinateurs. Le calcul des blocs ne serait pas possible sans utiliser de puissants moyens de calcul.

5.2.LES MESURES AEROPORTEES.

Ces dernières années l'évolution de la photogrammétrie s'est poursuivie en changeant encore de point de vue.

Après être passé du sol à l'avion, la chambre photogrammètrique s'est embarquée à bord de véhicules spatiaux pour des missions de cartographie de la surface de la Lune. Bien que l'orbite d'un satellite soit beaucoup plus stable que la trajectoire d'un avion, il fallait en déterminer les paramètres en n'utilisant que très peu de points connus au sol, très peu pouvant signifier un seul, des mesures faites de la Terre, et des mesures embarquées telles que des mesures de distances au laser ou au radar du point de vue au point du sol lunaire où le rayon aurait été réfléchi, sans toutefois bien préciser comment ce point serait identifié, où en proposant des solutions irréalistes telles qu'évoquer l'espoir de pouvoir percevoir, sur les photographies, l'image du flash laser renvoyée par le sol, ce qui est évidemment impossible.

Toutefois, ces auteurs doivent être crédités de l'idée d'utiliser des mesures embarquées synchronisées à la prise de vue même si, comme on le verra, les mesures de distances entre les sommets perpectifs et le sol ne sont pas en mesure d'appuyer un bloc sans le secours de mesures d'altimètrie.

Des progrès ont été, aussi, réalisés au Canada en utilisant des "pseudo mesures" qui peuvent être décrites comme

des équations de condition introduites dans les calculs sans que soient effectuées de véritables mesures.

Entrent dans cette catégorie, notamment, les niveaux des lacs vus sur plusieurs couples, dont l'introduction dans le calcul améliore, à peu de frais, les inconnues d'attitude des chambres, en supposant que leur surface soit parfaitement horizontale, à savoir, qu'à part des écarts locaux provoqués par les vents et d'éventuels courants de densité, la surface d'un lac est équipotentielle et perpendiculaire en tous points à la direction du fil à plomb. Excepté pour les grandes surfaces couvertes d'eau, de 30 Km et plus, où les écarts entre les altitudes orthométriques et les différences de potentiel peuvent devenir significatives, les rives d'un lac peuvent être considérées comme étant à la même altitude.

Au Canada au moins, où les utilisateurs, qui ne sont pas tous des Géodésiens, l'exigent, cette idée est traduite sur les cartes pour ne pas les dérouter. Cette exigence est, de surcroît, à l'origine de l'amélioration qu'on vient d'évoquer, laquelle intéresse toute l'altimétrie des zones où apparaissent les lacs. On verra qu'il peut exister d'autres domaines où des "pseudo-mesures" peuvent être utilisées.

5.3.EVOLUTION DES AIDES A LA NAVIGATION.

La mise en oeuvre de capteurs de navigation aérienne de plus en plus précis a tout naturellement amené les auteurs à envisager leur utilisation comme moyens d'appui au réseau photogrammétrique, pouvant se substituer partiellement aux appuis, et ce, avec des chances non négligeables de succès.

Puis a suivi une longue période au cours de laquelle les auteurs ont montré, par des simulations, le bénéfice qu'on pourrait tirer de mesures embarquées au cours du vol de prise de vue en faisant, sur la précision de ces mesures, des hypothèses plus ou moins fondées.

Dans la période récente ont été entreprises les premières expériences réelles d'exploitation de mesures aéroportées simultanées à la prise de vue.

5.4. L'ENREGISTREMENT DE PROFILS AEROPORTE: (L'APR)

La méthode d'enregistrement de profils aéroporté. (A.P.R.) est, en effet, utilisée depuis près d'un quart de siècle pour appuyer le réseau photogrammétrique. A l'Institut Géographique National ce procédé paraît avoir été utilisé depuis 1962.

Destinée à dresser des cartes aux petites et aux moyennes échelles, son rôle est de densifier un réseau d'appuis altimétriques de terrain. Elle a d'abord mis en oeuvre un statoscope qui est un baromètre différentiel, associé à un radar destiné à mesurer les hauteurs du point de vue au dessus du sol, qu'on a tenté de remplacer, dès 1964, puis vers 1972-1974 par un télémètre laser sans qu'on puisse encore noter d'amélioration sur les résultats obtenus à l'aide du radar.

L'idée a été reprise en 1978 à partir de matériels ayant fait leurs preuves dans d'autres domaines. Depuis 1979 l'emploi du télémètre laser s'est définitivement imposé. Ce sont les mêmes matériels qui ont été utilisés au cours des essais qu'on va

décrire.

Si les capteurs peuvent être exactement les mêmes, leur utilisation sera totalement différente.

Après la prise de vue qu'on envisage d'appuyer sur des profils A.P.R., l'avion observe des profils altimétriques placés dans la partie commune, aux bords des photographies, de deux bandes successives, ces profils sont reliés entre eux par des traverses, qui forment un réseau, dont certains points caractéristiques bien identifiables seront nivellés au sol, afin de déterminer les altitudes d'un plan isobare hypothétique sur lequel aurait été réglé le statoscope. Après compensation, on dispose de points d'appui d'altitudes connues de façon quasi-continue sur les bords des photographies ; on les identifie à l'aide de petits clichés 35 mm pris "simultanément", et suivant le même axe que le tir laser. De la sorte, l'avion après avoir été "photographe" devient "topographe" pour relever des profils. Les deux opérations étant séparées et rien n'empêcherait d'ailleurs qu'elles soient conduites à des dates différentes, ce qui se fait couramment à l'I.G.N.

Les éléments introduits dans les calculs d'aérotriangulation ont déjà été l'objet d'une compensation autonome, indépendante du réseau photogrammétrique.

Le matériel utilisé étant le même, les critiques qu'on sera amené à faire sur la fiabilité des mesures, notamment sur les mesures des hauteurs à l'aide du télémètre laser, seraient toutes aussi utiles pour les vols d'A.P.R. que pour l'usage qu'on en a fait.

5.5. LE PROJET DE RECHERCHE.

L'emploi de mesures aéroportées qu'on va présenter est tout à fait différent car, pour l'essentiel, les mesures et les photographies seront quasi-simultanées et, par conséquent, seront faites à partir, ou très près, du sommet perspectif; de plus, les calculs de compensation, lorsque celà restera possible, seront également faits en introduisant les mesures brutes, et non des mesures déjà compensées de façon autonome et indépendante.

Toutefois, les capteurs, que ce soit le statoscope ou le laser sont exactement les mêmes appareils que ceux utilisés pour les relevés de profils aéroportés; néanmoins, leur déclenchement doit être rigoureusement synchronisé avec la prise de vue, ce qui semble ne pas avoir été sans problèmes. Il ne s'agit plus de mesurer des profils, mais des altitudes de points précis. Voir la description de l'appareillage utilisé dans [3 BROSSIER].

Le projet de recherche initial était, pourtant, exactement d'utiliser les mesures statoscope et laser associées. Il s'agissait: d'une part, d'essayer en vol des capteurs de navigation et de mesures instantanées de la position de l'avion photographe et de tenter d'exploiter les mesures faites en aérotriangulation,

d'autre part, le projet étendu prévoyait, plus généralement, de saisir toutes les opportunités qui se présenteraient afin de tenter d'exploiter, en aérotriangulation, les mesures des appareils de navigation.

C'est ainsi que, par la suite, on a été amené à exploiter deux vols effectués en associant à la prise de vue

l'utilisation d'un récepteur G.P.S. NAVSTAR embarqué, essentiellement dans un but qui aurait pu se limiter à l'aide à la navigation pendant la prise de vue. Cette étude a été poursuivie afin de vérifier si les mesures G.P.S. pouvaient être utilisées pour déterminer la position des sommets des faisceaux perspectifs. Cette expérience ayant donné des résultats prometteurs a été poursuivie l'année suivante.

En définitive on a utilisé ces trois types de mesures aéroportées: télémètre laser, capteur de pression, récepteur de signaux des satellites NAVSTAR/G.P.S.en les combinant éventuellement entre elles afin qu'elles s'apportent mutuellement de l'aide.

En raison des coûts très élevés des stéréopréparations on a privilégié le nombre des chantiers à la qualité des points au sol afin de vérifier sur le plus grand nombre de cas possible la validité des modèles qu'on a proposé.

Si ces modèles sont très simples c'est justement parce qu'on a pu disposer des mesures de nombreux chantiers pour vérifier qu'ils restaient valables dans tous les cas. On avait, en effet, remarqué que les auteurs avaient toujours la tendance bien naturelle de les compliquer pour qu'ils s'ajustent parfaitement au chantier étudié en oubliant que les particularités d'un travail ne se retrouvent pas toujours sur les suivants.

De cette manière on a pu aussi justifier les erremens qu'on a pu adopter qui ne sont consacrés que par la pratique la plus courante et par le fait que les mesures des clichés comportaient des systématismes non modèlisés.

Pour cette raison on a considéré que les résultats ne pouvaient être apprécié que par les écarts moyens quadratiques sur les points de vérification.

5.6. LES MATERIELS UTILISES

Les mesures aéroportées qui ont été exploitées proviennent des appareils suivants:

Des mesures de pression différentielles ont été tentées à l'aide d'un statoscope, malheureusement cet appareil n'a pas fonctionné correctement et a dû être abandonné.

Des mesures de pression ont été, ensuite, faites à l'aide d'un capteur de pression CROUZET type 44, les résultats étaient exprimés en décimillivolts; la tension mesurée équilibrant une balance de force.

Par la suite les essais ont porté sur deux capteurs de pression CROUZET associés, le second, de type 2100, transforme la pression en fréquence, laquelle est numérisée pour donner les pressions absolues en hectopascals. Cette qualité étant, pour l'emploi qu'on en a fait, sans le moindre intérêt puisqu'on n'avait aucun moyen de traduire ces mesures en altitudes absolues avec toute la précision désirable, c'est-à-dire celle de points d'appui déterminés par nivellement barométrique, par exemple. Toutefois le 2100 est un capteur plus moderne que le précédent, en principe peu sensible aux accélérations verticales, mais, surtout, il fourni une information directement utilisable par un micro-ordinateur, alors que le type 44 nécessite l'emploi d'un convertisseur analogique-digital

La mesure de la distance quasi-verticale avion-sol a été faite à l'aide d'un télémètre laser T.A.Y 130 de la CILAS; les distances sont données en mètres, mais la quantité réellement mesurée est le temps mis par l'impulsion laser pour faire le trajet aller et retour entre l'émetteur et le récepteur placés à bord de l'avion, qui est transformé en longueur par la formule:

Distance = 2.c/t

c étant la célérité de la lumière fixée, dans l'appareil à 299,71 .10^6 m/sec

t étant, bien sur, le temps du parcours mesuré en seconde.

Par conséquent les effets retardateurs de l'atmosphère n'étaient pas pris en compte; par ailleurs l'arrêt de la mesure du temps de parcours de l'impulsion était commandé par un seuil d'énergie reçue, qui serait règlable; il semble que ce règlage ait posé quelques problèmes.

Enfin on a utilisé les mesures d'un récepteur NAVSTAR G.P.S de la SERCEL, embarqué une première fois à bord d'un AEROCOMMANDER, l'antenne employée, qui faisait saillie sur le fuselage de l'avion, n'aurait pas pu équiper un avion rapide tel que le MYSTERE 20.

Les coordonnées géographiques étaient données directement par l'appareil connecté à une HP 9825 en latitudes longitudes et hauteurs au dessus de l'ellipsoïde de référence W.G.S.72 puis W.G.S.84.

Ces coordonnées ont été fournies par SERCEL, qui participait à l'expérience, d'abord à l'aide d'un premier logiciel qui n'a pas donné immédiatement de bons résultats; les mesures brutes ont éte retraitées à l'aide d'un logiciel amélioré pour la circonstance, il a été utilisé exclusivement par la suite, les premiers résultats n'avaient, par conséquent, plus qu'un intérêt retrospectif , on ne les a pas donnés.

Enfin, dans les dernières expériences, SERCEL a remodelé les résultats de ce logiciel, pour tenir compte de mesures faites à poste fixe et qui permettaient de connaître les différentes dérives qui affectaient les résultats.

Les coordonnées obtenues par le premier logiciel, avant la prise en compte de mesures faites à poste fixe, sont appelées"pseudo-distances lissées par la phase" les secondes qui, à l'inverse, les prennent en compte, sont appelées "trajectographie".

Les résultats présentés dans le texte principal ne concerne que des mesures faites par "trajectographie", c'est-à-dire avec un récepteur fixe au sol, mais implanté très loin du chantier. L'effet de ce récepteur fixe n'a pas été sensible pour améliorer la précisin des déterminations, par contre la fiabilité des mesures est totale ce qui n'a pas été le cas avec les autres procédés, même ceux qui se sont montrés aussi préçis, par exemple les pseudo-distances lissées par la phase.

Des essais ont été fait avec un seul récepteur et d'autres essais a été menés en calculant les coordonnées des sommets à l'aide des pseudo-distances seules, les résultats qui sont donnés à titre de justification secondaire du choix du système de mesures, seront trouvés dans les annexes.

5.7.PROGRAMME DE RECHERCHE

Le problème consistait donc à vérifier que les mesures aéroportées étaient susceptibles de remplacer, au moins partiellement, des points d'appui au sol en les comparant aux positions que donnait une aérotriangulation effectuée à l'aide de moyens classiques. Si ces essais se révèlaient positifs, il convenait d'introduire ces mesures dans le programme de calcul utilisé au département des canevas du S.P.H qui n'avait pas, au début, le moyen de les accepter.

5.8.EVOLUTION DU PROGRAMME DE CALCUL UTILISE

Dès Juin 1985 le Département des Canevas passait d'un programme de calcul des blocs d'aérotriangulation par modèles indépendants à un programme de calcul par faisceaux.

Ce passage a été très rapide, le nouveau programme ayant démontré sa supériorité, car présentant des qualités d'interactivité plus agréables, pour les opérateurs, que son prédécesseur.

On a dû suivre l'évolution du programme de compensation, qui venait d'être mis en service, au moment où il bénéficiait d'améliorations considérables.

De 1984 à 1986, M. DUCLOUX entreprenait une étude des systématismes en photogrammétrie aérienne, qui eut pour effet d'introduire des paramètres de systématismes dans les inconnues des équations à résoudre, ce qui permettait de réduire d'environ 50% le nombre des points d'appui nécessaires, sans altérer la précision des résultats.

Cette importante amélioration fût rapidement adoptée, et le programme utilisé modifié en conséquence. Il convenait de signaler qu'on n'a pu en bénéficier, seulement, qu'en cours d'étude, et que ses conséquences n'ont été bien appréciées qu'après une utilisation assez longue. Notamment, l'introduction des "inconnues de systématisme DUCLOUX" a eu pour effet de rendre nettement moins efficaces les mesures aéroportées, en ce sens que le bloc d'aérotriangulation dépouillé du plus grand nombre de ses appuis se comporte beaucoup mieux en introduisant les paramètres de systématisme, qu'en se privant de cette aide, l'apport des mesures embarquées parait, par conséquent, réduit d'autant. On verra que lorsque les modèles des paramètres de systématisme représentent moins bien la réalité physique, pour des raisons qu'on ignore encore d'ailleurs, les mesures aéroportées sont les bienvenues et deviennent plus performantes, en outre, les mesures aéroportées apportent une aide considérable à la détermination des inconnues de systématisme.

La description des programmes utilisés n'était évidemment pas l'objectif de cette étude, pourtant on ne pourra guère y échapper, puisque les greffes à réaliser toucheront le coeur même du problème on les trouvera en annexes; en outre les publications existantes sur ce sujet faisaient référence, dans leur grande majorité, et dans les cas les plus intéressants, à des programmes de calculs par modèles indépendants. Il sera donc nécessaire de souligner les différences qui existent entre ces deux types de programmes.

6. LE BLOC PHOTOGRAMMETRIQUE SEUL.

6.1 LE BLOC D'AEROTRIANGULATION.

La description des propriétés d'un bloc d'aérotriangulation présente des difficultés réelles si on veut lui conserver un certain caractère de généralité; tous les auteurs s'y sont essayé sans grand succès. En effet, d'une part le bloc d'aérotriangulation seul, n'a pas d'échelle, ni d'orientation, ni de référentiel, d'autre part il n'est pas utile de définir des schémas stéreotypés de configurations de points d'appui prévues selon les règles de l'art, alors qu'on veut, justement, se placer dans des situations, où il n'est pas possible de les respecter, ou alors qu'on voudrait, au contraire, les transgresser.

Un bloc d'aérotriangulation est formé de plusieurs bandes de photographies, les photographies sont liées rigidement entre elles par un recouvrement stéréoscopique; les bandes sont raccordées par des points de liaison entre bandes, situés dans la partie commune aux deux bandes liées, et qui appartiennent à l'une et à l'autre bande. Ce raccordement se fait dans des conditions variables de rigidité, selon la position de ces points de liaison dans les bandes. Le cas le plus commun et le plus fréquent est celui de bandes parallèles de photographies, prises au cours du même vol, à la même altitude. Toutefois ces conditions n'ont rien d'impératives, et le programme FAISCEAUX traite aisément des ensembles de photographies aériennes, et autres, prises à des altitudes différentes, à des époques différentes, avec des chambre différentes.., dans des conditions qui auraient pu passer pour "exotiques", dans un passé pas encore très lointain.

La condition pour que les bandes contiguës forment un bloc est que chacune des bandes qui le compose soit raccordée à sa ou ses voisines par des points communs de telle sorte qu'elles puissent être mises en place, soit à l'aide de points d'appui au sol, soit à l'aide de points communs à d'autres bandes déjà appuyées; soit, enfin, à l'aide de tous ces moyens employés simultanément.

Ces conditions sont nécessaires mais non suffisantes, car aucune partie de ces bandes ne doit rester en porte-à-faux, en raison de la très faible rigidité de leurs bords, voir notamment [4 HUGHE 5 LASCAUX 6 BERNARD],et de leurs extrémités, ce qui impose la création de règles apparemment très sévères de connexité, mais rien n'empêche de calculer la bande seule, si elle est mal liée à ses voisines, simplement on ne peut plus affirmer qu'elle appartient à un bloc.

On verra plus loin que les règles adoptées, si elles paraissent sévères après un examen superficiel, sont au contraire très larges pour permettre d'inclure les cas les plus courants, et pour ne rejeter que les cas qui de toutes les façons se révèleraient "pathologiques" dans la suite des calculs.

Pour qu'une bande soit liée à une de ses voisines il faut qu'elles disposent de points communs.

Une règle de connexité, propre au programme, qui avertit l'opérateur de l'existence de bords en "échelons" trop hauts, ou de "créneaux "trop profonds, elle n'empêche pas le calcul. Mais les conditions d'appui de ces extrêmités doivent être vérifiées.

Il existe des problèmes liés à la faible rigidité des bords des blocs, et à ceux des déformations systématiques des extrémités des bandes, qui sont apparentes dans les études de simulation, et qui sont la conséquence de la "topologie de la matrice normale". Les règles de connexité ne sont pas de nature mathématique, elles sont de nature technologique et surtout pratique.

L'utilisation de mesures aéroportées devrait amener à adoucir ces règles car certains systématismes des porte-à-faux disparaîtraient si les clichés, placés dans cette situation, étaient liés par des mesures aéroportées; on y est parvenu sur les blocs de GUYANE avec, pourtant, des mesures des capteurs de pression fort médiocres, pour ne pas dire inacceptables.

6.1.1.LA BANDE.

Sauf conditions très particulières, les couvertures aériennes ressortissent d'archétypes assez peu nombreux, dont la description doit commencer par celui d'une bande.

Une bande est composée de clichés successifs photographiés, le plus souvent, au cours du même vol, à la même altitude, et liés rigidement entre eux, mais indirectement, par l'intermédiaire de points communs.

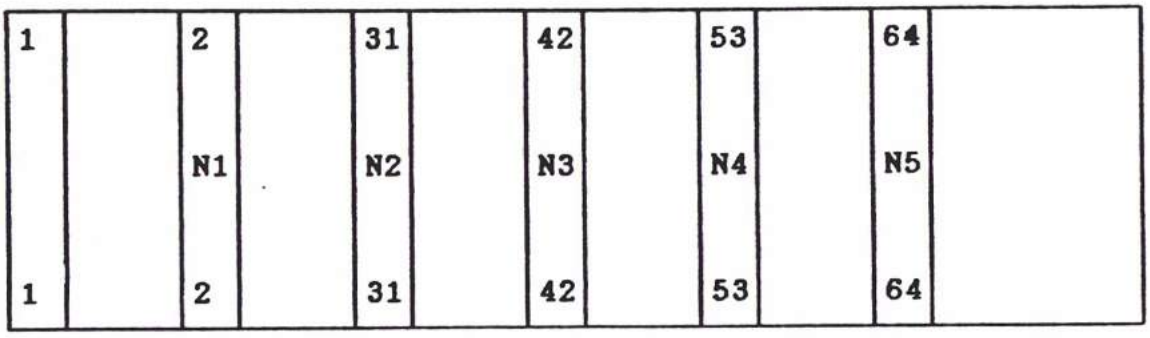
Pour que les clichés soient liés <u>rigidement</u> entre eux, ils doivent présenter un recouvrement dans le sens de la bande tel que les images des "points de nadirs" des clichés voisins, liés rigidement, doivent apparaître sur le cliché considéré, ou, encore, que chaque cliché ait une surface commune avec ses deux voisins, dans laquelle on puisse observer les points au sol stéréoscopiquement, ou, enfin, que la position de chaque sommet perspectif puisse être déterminée par les mesures des coordonnées clichés de points communs, vus sur <u>trois clichés successifs.</u>

La bande de terrain vue sur ces trois clichés doit contenir suffisamment de points homologues naturels, ou signalés (balisés), pour permettre la liaison rigide du cliché à ses voisins de droite et de gauche.

Si cette zone n'existait pas, ou si elle ne contenait pas assez de points de qualité, ou en quantité suffisante, ou suffisamment bien placés, la bande serait interrompue, ce qui signifierait qu'elle a perdu, en ce point, sa rigidité longitudinale, elle pourrait rester liée au reste de la bande par une articulation gênée [4 HUYGHE].

On remarque immédiatement que les premiers et les

derniers clichés des bandes présentent des cas particuliers, ou ces règles ne peuvent pas être respectées, et que, par conséquent, ces clichés ne sont pas tenus aussi rigidement que les autres .



Sur le croquis ci-dessus les clichés sont identifiables par leurs Nadirs Ni, i étant le numéro du cliché, et par leurs angles qui sont numérotés sur la partie la plus proche du bord du cliché auquel ils appartiennent, en sorte que i j indique une partie de la surface commune aux clichés i située à droite et j située à gauche.

Le recouvrement longitudinal minimal pour que la continuité soit assurée est, par conséquent, supérieur à 50%; les points des zones communes à trois clichés doivent être nombreux, bien identifiables, et bien répartis.

Lorsque le vol est facile on peut se tenir à un recouvrement de 55 à 60 %, mais avec 55% aucun écart en tangage ou en roulis ne sera tolérable, la bande commune aux trois photographies successives pouvant disparaître, ou être réduite à un triangle ou à une surface si réduite, qu'elle ne laisserait aucun choix pour des points bien nets. En outre, près des bords des photographies les images sont de qualité exécrable et de fidélité dimensionnelle douteuse, en raison de la proximité de la discontinuité mécanique, que représente l'interruption de la couche de gélatine, et/ ou la coupe du cliché. L'image des repères de fond de chambre et de leur supports constitue également une gêne pour choisir les points de nadir des deux clichés voisins. Enfin les variations d'altitude du terrain photographié imposent le choix de valeurs très prudentes pour les recouvrements, qui sont alors prévus en tenant compte du champ couvert par chaque photographie.

L'intérêt qu'on a d'assurer un large recouvrement est contradictoire avec les nécessités de rendements élevés à la restitution, lesquels sont atteints lorsque les surfaces restituables des couples, qui se trouvent grossièrement limitées à la surface comprise entre les deux lignes de "points de nadir", sont maximales, par conséquent la base stéréoscopique doit, aussi, être maximale, et les recouvrements minimaux.

Lorsque l'aérotriangulation est une fin en soi, c'est-à-dire lorsqu'elle n'a pour but que de déterminer les coordonnées de points au sol, sans que celà soit suivi d'une restitution,comme dans les opérations de densification de réseaux, par exemple, il n'y a aucun intérêt à ne pas bénéficier de la rigidité de la bande qu'apportent des recouvrements élevés des clichés, toutefois le coût du vol et de la préparation en atelier seront plus élevés.

I.En cas d'aérotriangulation suivie de restitution, un recouvrement longitudinal de 60%, dangereusement réduit, parfois, à 55%, avec une base de :

(100 - recouvrement) soit 40 ou 45%.

II.En cas d'aérotriangulation pure, sans restitution, un recouvrement pouvant aller jusqu'à 80% pour lequel sur chaque cliché on peut observer cinq (5) lignes de nadirs de cinq clichés successifs, ce qui n'améliore que l'altimétrie, d'ailleurs.

Les recouvrements longitudinaux et trans versaux élevés facilitent l'émergence de phénomènes d'autocorrection des erreurs systématiques résiduelles très faciles à mettre en évidence.

Les recouvrements transversaux, en général, feront l'objet d'un traitement spécial, à part, car ils ont une importance particulière pour la précision altimétrique.

6.1.2.LE BLOC.

Le bloc d'aérotriangulation seul n'est composé que de "visées" reliant les points de terrain aux sommets perspectifs des clichés, où ils sont vus, en passant par le point mesuré sur le cliché; la plaque photographique sert, par conséquent, de goniomètre. C'est, d'ailleurs, pourquoi la continuité d'une bande ne peut être assurée que par l'observation de points communs à trois clichés successifs, les "mesures" ne portent que sur des angles et la liaison assurant la continuité, faute de mesures de longueurs, doit associer trois sommets. Voir le graphe de connectivité figure 1.

A l'aide de l'équivalence mécanique [7 MILLION] on peut considérer que le bloc est constitué de tiges télescopiques, c'est-à-dire sans rigidité longitudinale, reliant les sommets des faisceaux: les points de vues, aux points du terrain, en passant par leur image sur les clichés, images auxquelles seraient attachés des ressorts dont la raideur serait fonction des écarts-types a priori de ces mesures. Les tiges n'auraient aucune rigidité longitudinale, et une rigidité infinie perpendiculairement à leur direction. Cet ensemble mécanique est sans échelle, et sans orientation dans l'espace. Si on lui donne une échelle en fixant, par exemple, arbitrairement une longueur, on constate que sa rigidité dans son plan est très grande, en raison de la présence des points de liaison entre bandes, et surtout de sa forte inertie d'axe Z, à l'inverse, sa rigidité est beaucoup plus faible suivant l'axe Y, car son inertie est notablement plus faible, et, pour le bloc normal, quasi-nulle selon l'axe X.

Encore faut-il prendre un certain nombre de précautions, la rigidité d'un bloc dépendant d'actions, par exemple la flexion suivant un axe, et de la position des points où s'exerce cette où ces actions. La flexion suivant l'axe Z peut s'obtenir à l'aide de trois bandes de points.

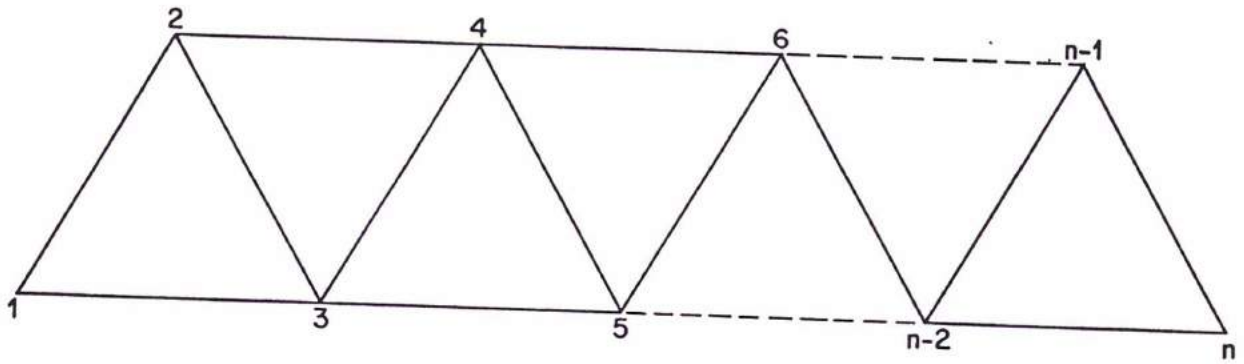
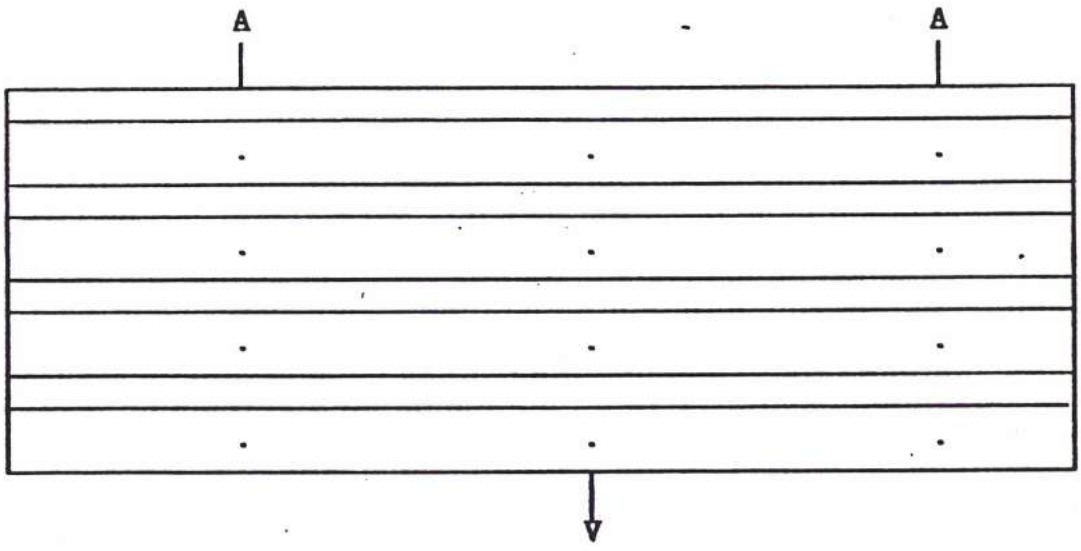
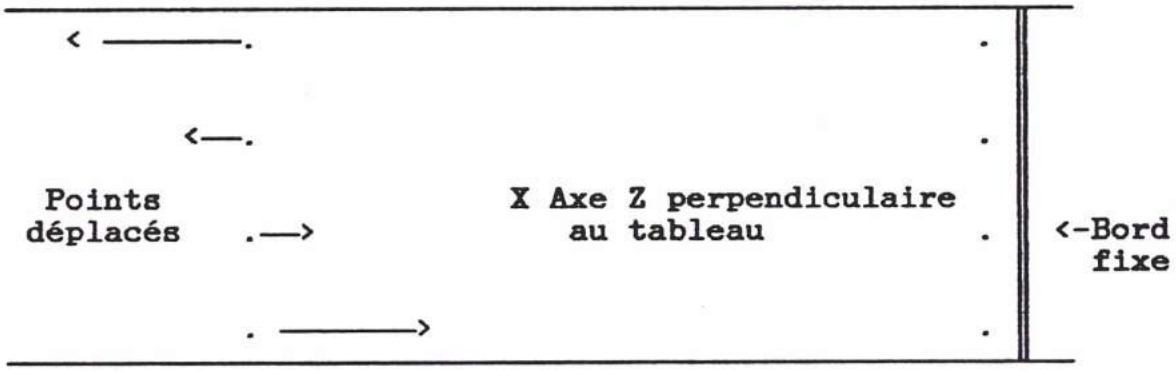


DIAGRAMME DE CONNECTIVITÉ D'UNE BANDE

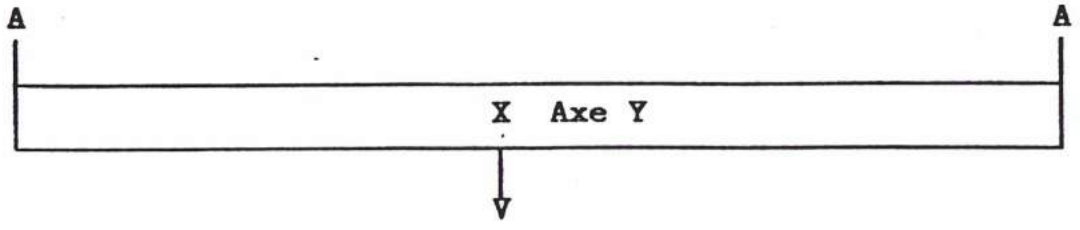
Figure 1

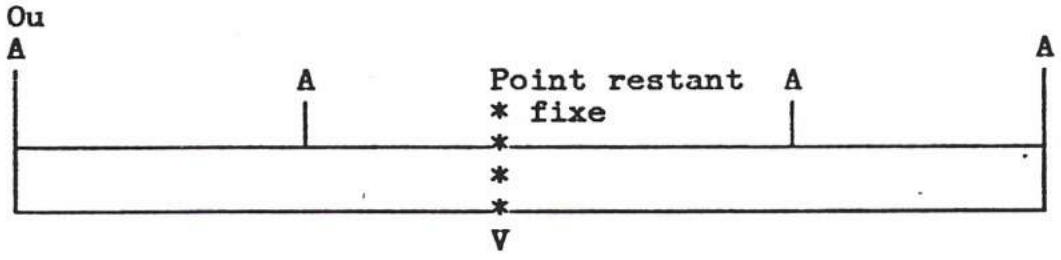


Les coordonnées de la bande de points centrale sont faussées d'une quantité égale de haut en bas, c'est la démarche classique qui n'est pas une flexion pure, laquelle est obtenue en ne considérant que deux bandes de points dont une seule est faussée proportionnellement à la distance de chaque point à l'axe neutre, lequel n'est pas facile à déterminer.



La rigidité du bloc s'apprécie en calculant l'énergie complémentaire à l'énergie intrinsèque du bloc, c'est-à-dire la majoration de la somme des carrés des résidus apportée par la déformation imposée par rapport à la solution intrinsèque qui est donnée par un calcul sur appuis infiniements souples, rapportée a l'écart-type a priori, en d'autres termes une compensation libre.





Toutes les simulations sont faites sur des blocs qui, sans difficulté peuvent rester théoriques, la position des points dans la réalité résulte de la superposition de clichés sur lesquels ils sont placés, à des emplacements peu variables d'un bloc à l'autre, selon un motif qui se répète tout au long de la bande, de bande à bande, et de bloc à bloc.

La position des appuis étant d'une très grande importance sur les résultats, il n'est pas possible de donner aux produits des simulations toute la généralité qui serait souhaitable, sauf en considérant le bloc comme un solide appuyé sur une infinité d'appuis élastiques, très souples, et en appliquant des déformations en certains points, et encore, le rapport entre la rigidité des points d'appui et celle du bloc est un facteur de variations non négligeable qui conditionne, largement, l'étendue de la zone d'action d'un point d'appui, et surtout, d'un point d'appui central.

En effet, la solution intrinsèque de l'ajustement d'un bloc normal ne peut pas être trouvée avec une configuration minimale de points, sans être gênée par sa quasi-singularité, à l'inverse, si on calcule le nombre minimal de points nécessaire pour lever cette quasi-singularité, on est gêné par le fait que la singularité n'est pas totale, car il se développe des raideurs parasites dans les charnières. Bien entendu ces inconvénients n'existeraient pas avec le bloc homogène, mais il restait souhaitable de traiter les deux types de blocs, de préférence, avec la même méthode, pour rester dans le cas le plus général.

C'est pourquoi on a adopté, parmi toutes les solutions possibles, celle qui consistait à donner un poids négligeable à tous les points d'appui, pourvu qu'ils soient très nombreux pour représenter un "milieu élastique homogène", dans ce cas très précis, et pour lui seulement, les qualités mécaniques intrinsèques du bloc normal ont un sens.

Il existe aussi la solution la plus courante, largement exploitée par les auteurs, qui consiste à placer les points d'appui dans les positions stratégiques, où ils sont le plus souvent implantés, par exemple aux quatre angles du bloc, avec éventuellement un point au centre, ou une bande de points d'appui aux extrémités des bandes orientées dans un sens perpendiculaire à celui du vol avec, éventuellement, une bande de points intermédiaires, médiane, équidistante des précédentes, et qui leur soit parallèle.

On s'était donné pour objectif de refaire les simulations dont les résultats étaient présentés dans la littérature spécialisée, de les généraliser selon les lignes directrices évoquées plus haut, et de faire des simulations intéres-

santes pour le sujet précis qu'on traitait.

Le bloc ne peut être calculé seul, sans un minimum de points d'appui, soit, en aérotriangulation, deux points connus dans leurs trois coordonnées, et un point connu en altitude.

Cette configuration devrait, en principe, être suffisante et permettre de connaître la précision interne du bloc, c'est-à-dire l'écart-type minimal de ses mesures, faites sur les clichés.

Or, un bloc normal calculé dans une telle configuration, s'il permet effectivement de connaître sa précision interne, présente, on l'a vu, des anomalies remarquables:

On avait d'abord calculé un bloc destiné à servir de comparaison sur le chantier de la Souterraine, pour apprécier l'apport des mesures aéroportées. On s'était servi, comme élément référence, d'un bloc privé de la grande majorité de ses points d'appui.

On n'avait conservé que quatre (4) points d'appui connus en planimétrie et quatre (4) points d'appui connus en altimétrie situés aux 4 angles du bloc; pour s'apercevoir que cette disposition était très mauvaise, et lorsqu'on ne disposait que de si peu de points il était bien préférable de les disposer autrement.

On avait ensuite constaté qu'il était totalement inutile, et même dommageable, d'introduire, dans cette configuration, des inconnues de systématisme qui, avec aussi peu d'appuis, ne pouvaient plus être déterminées correctement [8 KUBIK]. Ceci est contesté par M.HOTTIER qui considère que les inconnues de systématismes, sauf une, de M.de MASSON d'AUTUME pouvaient être déterminées en l'absence de points d'appui au sol

Les résultats étaient spectaculaires, car tous les points désactivés servaient de points de contrôle dans tout le champ du bloc, et ils étaient très nombreux.

Les écarts au centre du bloc atteignaient - 35 mètres et jusqu'à - 27 mètres au milieu des petits cotés. On avait noté que la déformation totale dépendait de la position des points d'appui choisis. Pour cette raison on avait fait deux essais:

Dans le premier essai, déjà décrit plus haut, les points étaient situés aux angles du bloc qui était totalement effondré; après calcul dans cette configuration on avait déplacé les points d'appui à l'intérieur du bloc, après avoir constaté que les premiers et les derniers sommets des prèmiers et des derniers clichés de chaque bande étaient moins bien tenus et , par conséquent, moins rigides que ceux qui les précèdaient, ou les suivaient. On s'était enfin arrêté à une disposition bien particulière: on avait choisi de s'appuyer sur les points de terrain placés en liaison entre bandes; cette disposition, qui n'était peut être pas la meilleure, permettait de bénéficier de plus de deux visées sur les points d'appui et, ainsi, de connaître la qualité de la liaison entre le bloc photogrammétrique et le terrain, laquelle acquierait d'autant plus d'importance , que les points d'appui étaient moins nombreux. On avait obtenu un bloc déformé en dôme ce qui était classique, du moins à l'IGN (M. DUCLOUX nous avait signalé que, sur des blocs observés par des Allemands, et qui lui avaient été transmis dans le cadre

d'une étude européenne commune sur ce sujet, il avait relevé des déformations en cuvette, c'est-à-dire avec une courbure inverse de celle décrite plus haut.) Figure 2

A ce stade de dépouillement la moindre faute compromettait le travail; ce ne serait pas les mesures statoscopes, ni même, et on peut le déplorer, les mesures laser, qui n'étaient connues qu'à une constante près, qui auraient pu permettre de rattraper ou de détecter un point d'appui faux.

6.1.3.SIMULATIONS DES EFFETS DES MESURES DE HAUTEUR PAR TELEMETRE LASER.

On avait pu observer, dans la configuration de points d'appui donnant le maximum de déformation, que les déformations notées aux points d'impact laser, c'est-à-dire au sol, sous les sommets perspectifs, étaient les mêmes que celles des sommets correspondants d'où avait été fait le tir laser, à moins d'un mètre près.

Cette constatation était d'importance, elle prouvait que les mesures de hauteur laser, seules, n'étaient pas capables de redresser un bloc déformé verticalement.

Elles pouvaient, comme on le verra, améliorer les résultats obtenus à l'aide des mesures statoscope; seules elles étaient inopérantes.

6.2. LE BLOC NORMAL.

On s'était aperçu, ensuite, par des simulations très simples, que le bloc, qu'on appelera normal, c'est-à-dire celui dont les clichés ont un recouvrement longitudinal de 60 %, et les bandes un recouvrement transversal compris entre 10 et 20 %, n'avait aucune rigidité transversale, il avait, par contre, une grande rigidité longitudinale en sorte qu'appuyé sur une configuration minimale de points d'appuis, deux appuis connus dans leurs trois coordonnées et un appui connu en altimétrie situé aux angles, sa matrice était presque singulière. Figure 3

Le résultat était plus parlant avec quatre points d'appui situés aux angles, dont deux connus dans leurs trois coordonnées, et deux connus en altimétrie, l'introduction d'un cinquième point altimétrique, au centre du bloc, faux de 20 m par exemple, pour des clichés au 1/30.000ème, ne perturbait absolument pas les résidus clichés, qui restaient minimaux; la faute n'introduisait aucune tension dans le bloc normal, qui, n'ayant aucune rigidité transversale, n'en était pas affecté.

Dans ces conditions, il semblait bien que l'introduction de mesures aéroportées, pour remplacer les points d'appui , serait peu efficace en altimétrie, surtout si on se fixait des inconnues des modèles des mesures aéroportées par bandes, et non par chantier. La détermination de ces inconnues sur les bandes ne bénéficiant pas, directement, de points d'appui, devenait problématique pour le bloc normal. On a illustré celà par deux figures concernant le bloc de VICHY qu'on avait privé, volontairement, des deux bandes transversales, qui le rendaient homogène, pour le transformer en un bloc normal; on l'avait, d'abord, appuyé sur quatre points placés aux angles puis on avait activé les mesures statoscope; le bloc n'ayant aucune raideur transver-

sale ne pouvait pas transmettre correctement les constantes du statoscope aux bandes intérieures, qui se sont effondrées, comme on peut le voir figure 4, par contre les bandes latérales, où étaient placés les points d'appui, étaient correctement tenues les écarts sur les points de contrôle étaient faibles. Puis on a placé des appuis aux extrèmités du bloc, selon des lignes perpendiculaires au sens du vol, en prenant bien soin que chaque bande bénéficie, au moins, d'un appui en début et en fin de chaque bande, la situation redevenait tout à fait normale, comme on pourra le constater sur la figure 5.

On a déjà évoqué pourquoi on avait pris la position qui consistait à fixer les inconnues des mesures aéroportées par bande, et non pour l'ensemble du chantier, ce qui paraissait absolument nécessaire pour les mesures de position des sommets par G.P.S., en raison des pertes de réception dans les virages, mais il faudrait encore en prouver la nécessité et l'efficacité pour les mesures des statoscopes ou capteurs de pression et du laser, autrement que pour traîter des chantiers dont les bandes ne seraient pas observées dans les mêmes conditions et le même jour.

6.3. LE BLOC HOMOGENE.

6.3.1. GENERALITES.

Un bloc qu'on pourrait nommer homogène ou isotrope serait sensiblement celui dont les rigidités longitudinales et transversales seraient les mêmes, c'est-à-dire, un bloc ne présentant pas l'anisotropie qu'on a constatée et décrite sur le bloc normal; ce qui pourrait être obtenu, par exemple, en donnant aux bandes les mêmes recouvrements qu'aux clichés, ou en observant des bandes transversales perpendiculaires, ou plus simplement recoupant les bandes longitudinales utiles par des bandes transversales dans des conditions telles que le bloc ait une rigidité isotrope ou presque.

Malheureusement, le doublement du nombre des photographies prises, qui alourdirait l'exploitation cartographique ultérieure des photographies, sauf avec un vol effectué avec un recouvrement transversal de 60% dont on ne restituerait qu'une bande sur deux, n'est employée qu'en métrologie, où les coordonnées des points utiles sont directement obtenues des calculs d'aérotriangulation, qui ne sont pas suivis de restitution. Figure 6. Certains, tels la N.O.A.A, utilisent de façon courante des blocs avec un recouvrement transversal de 60%, d'autres seulement pour les travaux de haute précision.

6.3.2.BANDES TRANSVERSALES.

On peut rendre le bloc d'aérotriangulation presqu'homogène en combinant des bandes perpendiculaires ou, au moins, en recoupant les bandes du vol utile. Cette manière serait plus économique que le doublement des bandes longitudinales, elle n'a eu pourtant ni la faveur des aviateurs, qui devaient prendre de nouveaux repères pour observer ces bandes perpendiculaires, ni celle des opérateurs/trices, chargés de la préparation des clichés, et du report des points de bandes à bandes; en outre elle avait, le défaut d'augmenter le temps de calcul dans des

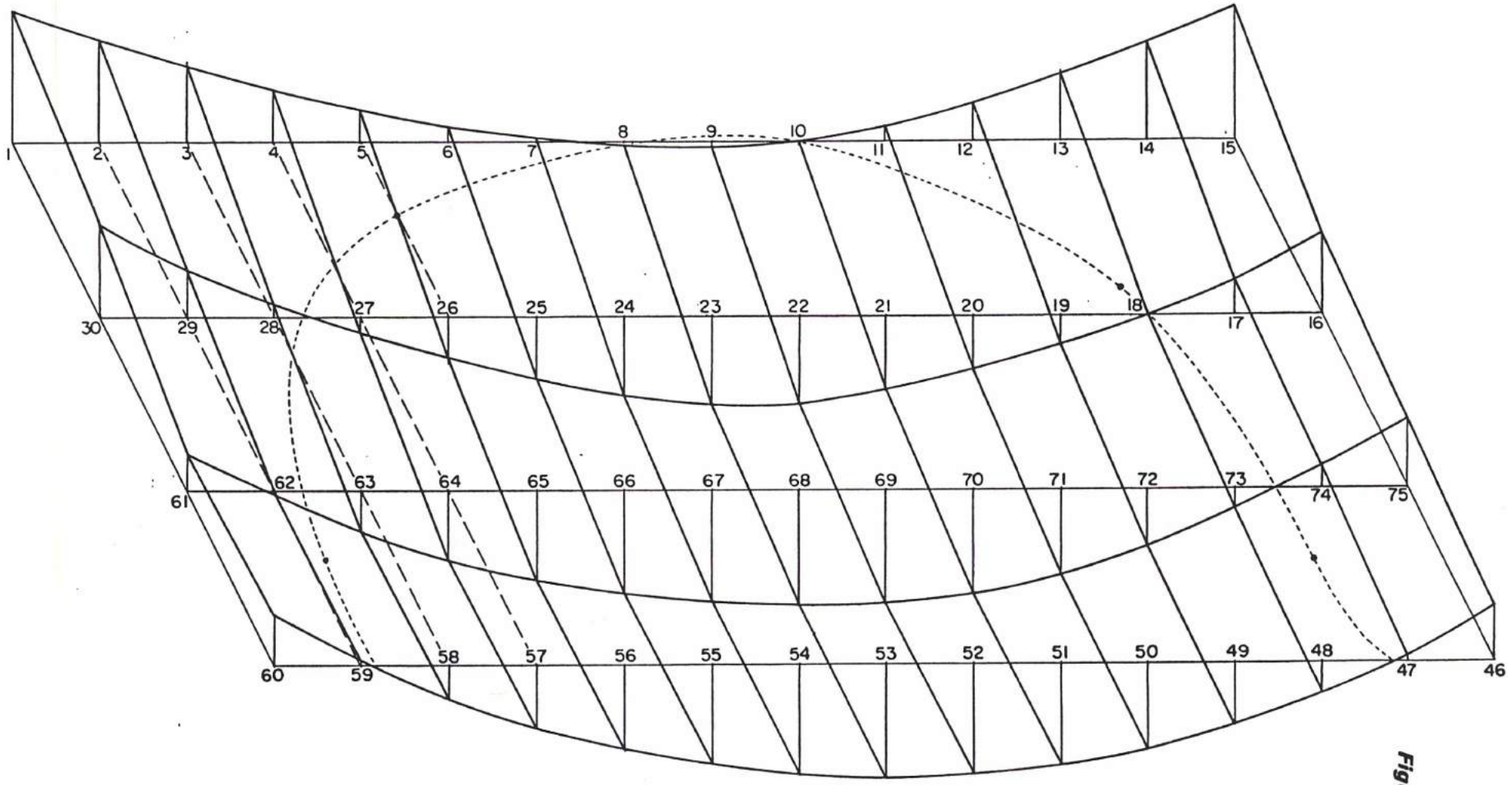
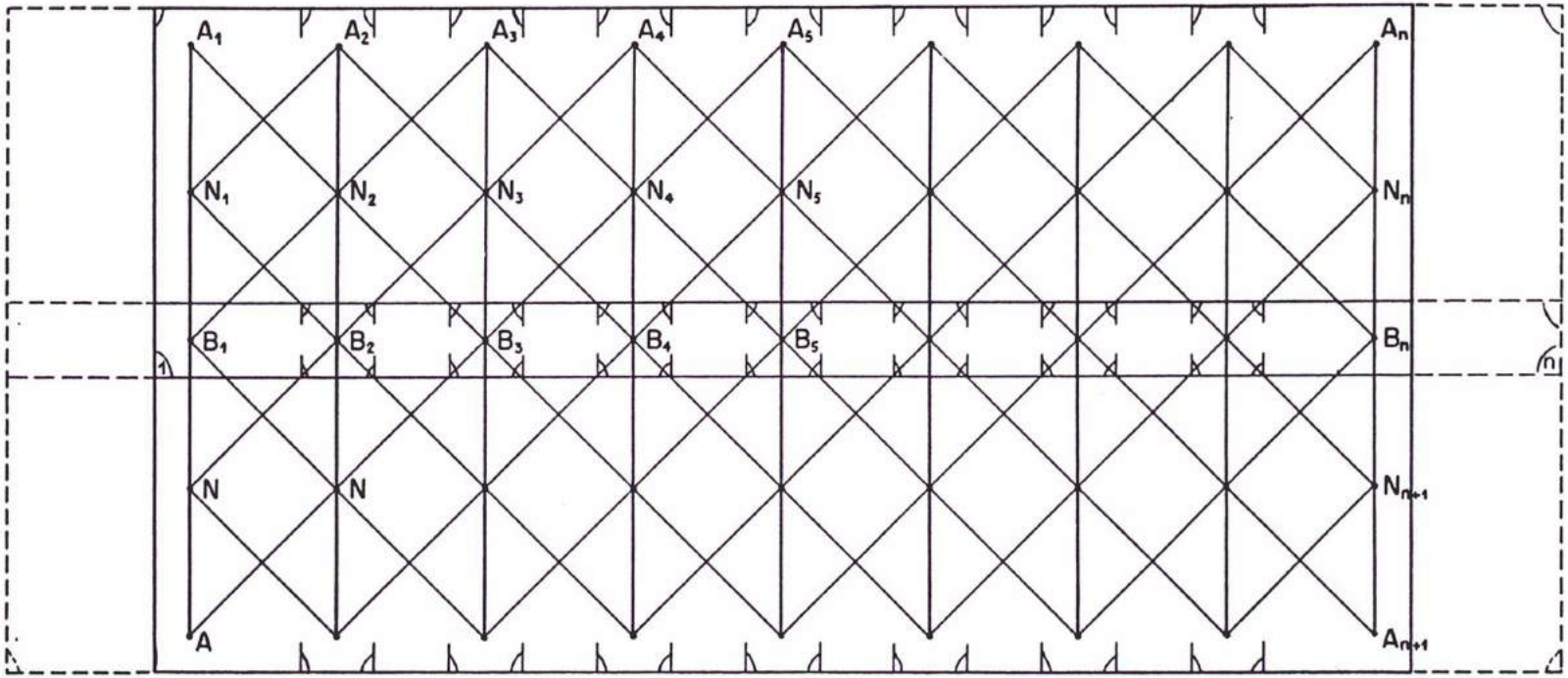


Figure 2

APPUIS ENTRE LES BANDES



LIAISONS ENTRE BANDES

BLOC NORMAL

Figure 3

67500.
69000
135000
120000
135000
120000
Points TERRAIN :
Ecarts TERRAIN :
en XYZ
en XY
en Z
inutilise
ech : 1/500.00
750 cm
ecart altimetrique
appui
controle
actif
inactif
I-R0545
ECHELLE 1:160000

Figure 4

675000

690000

135000

120000

Points TERRAIN :

Δ en XYZ Δ

▽ en XY ▽

▫ en Z ▫

▫ inutilisé ▫

appui contrôle actif inactif

Ecarts TERRAIN :

éch : 1/500.00

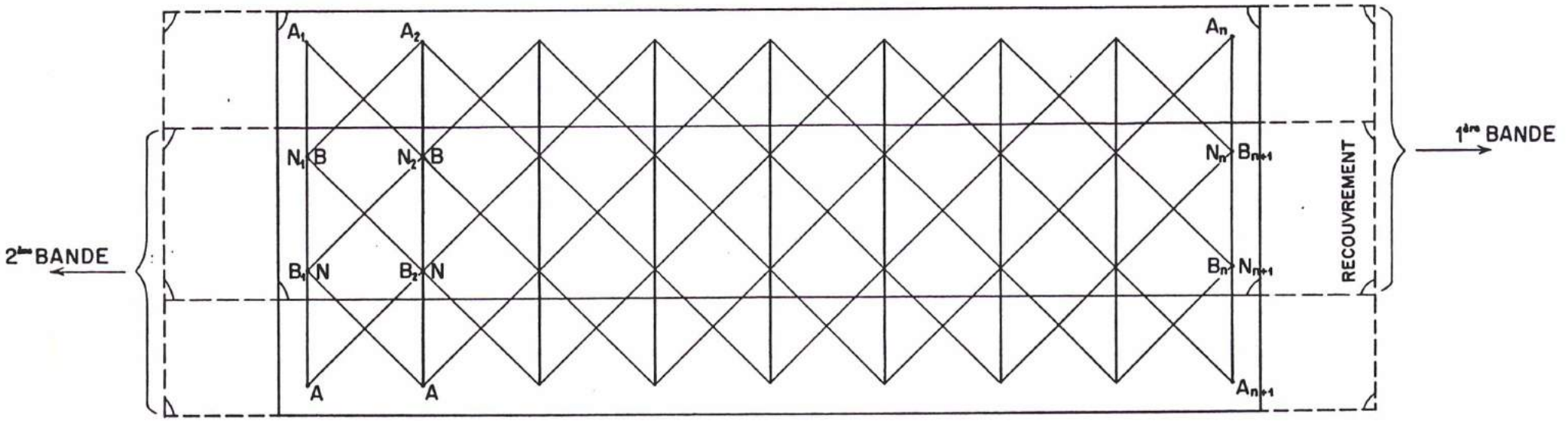
750 cm

écart altimétrique

:R0545

ECHELLE 1:160000

Figure 5



LIAISON ENTRE BANDES

BLOC HOMOGÈNE

Figure 6

proportions considérables, la majoration du temps de calcul qu'on avait pu mesurer était de 70 à 80%, le problème posé, à ce niveau, était beaucoup plus celui du temps d'occupation du matériel que celui du coût du calcul.

Comme dans le doublement du nombre des bandes on créait des relations de voisinage entre des clichés, qui n'en avaient pas auparavant, et on "emprisonnait" des zéros dans la matrice normale, il semblait, de plus, que l'algorithme du Banquier (ANNEXE III,C,3,b) perdait beaucoup de son efficacité. Il suffisait, pour s'en persuader, de simuler l'action de l'algorithme du Banquier sur des blocs artificiels, pour vérifier que les clichés des angles des blocs n'étaient plus parmi ceux qui avaient le moins de voisins, alors qu'habituellement, c'étaient les meilleurs candidats au départ d'une classification, n'"emprisonnant" que le moins de zéros possible. Cela perturbait le choix des douze clichés "candidats" au départ des classifications, parmi lesquelles on choisissait la plus performante, allant du cliché qui a le moins de voisins à celui qui en a le plus.

Malgré ces inconvénients, ce procédé, préconisé il y a quelques années, pour d'autres raisons, par M.G.de MASSON d'AUTUME et par le professeur ACKERMANN, devrait être retenu; les difficultés de transfert d'un point d'une bande à l'autre ne doivent pas masquer le fait que le bloc normal est quasi-singulier, et que cela sera toujours choquant, mais pourrait, aussi, devenir gênant lorsque des difficultés imprévues se présenteront, il existera toujours des situations dans lesquelles disposer d'un bloc homogène serait d'un grand secours comme, par exemple, la présence de fautes dans les mesures, ou même, simplement dans les calculs topographiques extérieurs, notamment sur tout un chapelet de points d'appui, liés entre eux par des mesures les rendant dépendants les uns des autres; la certitude qu'on aurait de la rigidité du bloc permettrait, à coup sûr, de retrouver la source de la faute; avec un bloc normal il subsisterait toujours un doute, même s'il restait, le plus souvent, assez faible.

C'était en raison de l'équivalence qui existe entre un réseau photogrammétrique et une structure mécanique [7 MILLION] qu'on a proposé de placer des "entretoises"constituées de bandes de vol, perpendiculaires à la direction générale du vol utile. Ces photographies ne seraient utilisées qu'en aérotriangulation avec des mesures aéroportées, sans perturber et alourdir l'exploitation cartographique ultérieure. Ces bandes transversales bridaient le bloc, en l'empêchant de se déformer au prix de quelques problèmes de report de points de bande à bande, et d'une forte augmentation du résidu moyen quadratique interne des clichés, qui avait, pour conséquence contradictoire une amélioration du résultat final; ce qui pourrait apparaître comme peu conforme à la théorie des erreurs accidentelles [voir chapitre 7], si on ne se souvenait pas que le bloc restait déformé par des systématismes mal modèlisés, et que, pour les combattre, il était inévitable de le contraindre à des déformations inverses qui augmentaient les résidus d'ajustement.

Ce point était apparu assez important pour qu'on le développe à part.[7.6].

7. PONDERATION DES DIFFERENTES CATEGORIES DE MESURES.

7.1 PREAMBULE

Les problèmes posés par la pondération des mesures hétérogènes dans une compensation par les moindres carrés et par la modèlisation des erreurs sytématiques des mesures faites sur les clichés aériens n'entraient pas dans le cadre de cette étude.

Toute personne entreprenant un travail sur un sujet touchant l'aérotriangulation se heurterait aux problèmes traités aux paragraphes qui vont suivre. Toutefois depuis que ces problèmes se sont imposés, personne ne les a résolus de façon vraiment satisfaisante et universelle. Dans le cadre d'une Division de production on a utilisé les moyens mis habituellement en oeuvre pour les travaux courants.

En faisant des compensations libres il était facile de vérifier qu'il subsistait des systématismes malgré l'utilisation des inconnues de systématisme de M.DUCLOUX. Ils pouvaient avoir deux origines: soit des systématismes qui ne peuvent s'autocorriger sans l'effet des points d'appui surabondants (affinité de M.G.de Masson d'Autume) [8,18, KUBIK, E.P.R.S références de 1987 et 1988], soit de véritables systématismes résiduels, soit enfin, plus probablement, un mélange des deux.

Des essais ont été faits pour compléter le jeu des inconnues de M.DUCLOUX. En utilisant ces nouveaux jeux d'inconnues de systématisme, qui auraient dû être meilleurs, on a pu constater que ces "améliorations" n'étaient pas toujours favorables et qu'elles pouvaient être, parfois, franchement mauvaises. Une démonstration très pertinente de ce phénomène se trouve dans [9 H.D.HUANG.]

On se heurte, souvent, à deux conceptions opposées:

L'une à vocation apparemment universelle c'est-à-dire s'appliquant indifféremment à diverses chaînes de production, utilisant des variantes très élaborées des classiques polynômes d'interpolation qui ne s'appliquerait qu'à des blocs bénéficiant de nombreux appuis au sol de très bonne qualité, c'est-à-dire prébalisés; l'autre ne s'appliquant qu'à une chaîne de production précise pour laquelle on à tenté, de façon forcement imparfaite, de modéliser les phénomènes physiques, mais qui, à l'inverse de la première, s'accommode d'un réseau de points d'appui très peu nombreux et de mauvaise qualité, c'est précisémment le cas des inconnues de systématisme de DUCLOUX pour les clichés aériens de l'I.G.N.et des essais présentés.

La pondération des mesures hétérogènes intéresse les Géodésiens depuis de nombreuses années, bien que certains considèrent que cela est tout simplement impossible!

Ce qui rend le problème compliqué à résoudre c'est que les résidus de la compensation sont le résultat, non seulement de la dispersion des mesures, mais aussi de la géométrie des observations du bloc. C'est l'effet de cette géométrie qu'il faut parvenir à filtrer.

M.HOTTIER a proposé une solution concernant la pondération des mesures hétérogènes non biaisées mais sans rien publier pour l'instant, un de ses élèves a été chargé de vérifier et d'expérimenter la méthode qu'il a mise au point.

Pour l'instant il semble les résultats obtenus, appréciés au niveau des points de vérification, ne seraient pas en mesure d'améliorer ceux qui seront donnés, probablement en raison de la présence des systématismes résiduels dans les mesures clichés, sans remettre en cause les paramètres choisis pour représenter les sytématismes des clichés.

En effet, les deux problèmes sont intimement liés, plus qu'on ne le souligne habituellement, car non seulement le choix des paramètres de systématisme est important mais, et c'est cela que l'on ne souligne pas assez, le choix des poids à donner aux équations "d'information" appelées aussi équations de "stabilisation" a une influence considérable sur la valeur des résidus d'ajustement. C'est pour cette raison qu'on fera immédiatement un très bref exposé sur les paramètres de systématisme.

7.2.LES PARAMETRES DE SYSTEMATISME ET LES SYTEMATISMES RESIDUELS.

On s'était aperçu, il y a près de 30 ans, de la présence de systématismes dans les mesures faites sur les clichés, les causes en sont tellement variées qu'il ne saurait être question de les rappeler de crainte d'oublier l'une d'entre elles; le mérite de M.DUCLOUX est d'avoir décelé une cause majeure d'erreurs systématiques sur les clichés de l'I.G.N. cette cause étant étroitement liée aux conditions de prise de vue, sa méthode n'est peut être pas extrapolable aux autres chaînes d'acquisition et de production de photographies aériennes.

On va passer en revue, rapidement, les différentes démarches des expérimentateurs:

- Soit on modélise "a priori" les erreurs systématiques des clichés en écrivant, à la suite des relations d'observation des clichés, des équations représentant les systématismes des clichés, par des combinaisons linéaires de fonctions des coordonnées des points observés généralement des monômes et des polynômes. Les inconnues de systématismes sont les termes multipliant ces fonctions, elles ne servent qu'à éliminer les systématismes. En inversant la matrice normale on recherche les paramètres qui seraient corrélés entre eux ou avec les autres inconnues "utiles" afin de les éliminer. On ne recherche, par conséquent, aucun modèle physique particulier car on vise à l'universalité des paramètres trouvés.
- Soit, comme l'a fait M.de Masson d'Autume, on modèlise les fonctions censées représenter les erreurs systématiques des clichés d'après les déformations relevées sur

une bande libre (une torsion autour de l'axe de vol, deux courbures de la bande, l'une d'axe vertical, l'autre d'axe horizontal qui lui serait perpendiculaire, une variation de l'échelle le long de la bande, enfin une affinité en y) en calculant les systématismes des clichés qui pourraient être la cause de ces déformations, au niveau du motif périodique formé par les liaisons entre les clichés aux points de" Von Grüber".

C'est une proposition de M.HOTTIER qui a sorti de l'oubli la communication originale qui n'était pas très claire dans sa première version.

- Soit, comme l'a fait M.DUCLOUX, en modélisant un phénomène physique précis, en le complétant, en tant que de besoin, de modèles éprouvés de déformation de l'image (Courbure de la bande, etc..).

Cette dernière méthode est la seule qui soit raisonnable pour les modèles des mesures aéroportées.

- Etc...la liste n'étant pas exhaustive, et sans doute de fort loin.

Dans les trois cas les équations d'observation liant les inconnues utiles **x** aux mesures **m**, sont complétées par des inconnues de systématisme **y**.

$$A.x + B.y = m - e$$

A est la matrice de linéarisation des équations d'observation.

B est la matrice des fonctions qui veulent représenter les systématismes.

e est le vecteur des erreurs aléatoires.

On ne pourrait pas s'arrêter là; en effet, si les inconnues de systématismes **y** pouvaient prendre des valeurs quelconques, elles donneraient des degrés de liberté à la bande (deux courbures, une torsion un facteur d'échelle et une affinité quelconques, dans le cas le plus parlant des inconnues de M.d'Autume) ce qui rendraient le bloc instable et sans consistance. C'est là qu'interviennent les équations de"stabilisation" ou d'"information" qui bloquent ces inconnues à des valeurs qu'on juge "raisonnables". Ces valeurs auront une grande incidence sur la valeur des résidus des observations après compensation.

Ces équations sont:

$$y = 0$$

mais en leur donnant un écart-type de l'ordre de grandeur du systématisme attendu. Ce qui est évidemment très vague et n'est justifié que par la qualité des résultats obtenus.

Les inconnues de systématisme donnent au bloc un "jeu" quelconque, par conséquent lui font perdre toute rigidité.

Une partie de cette rigidité perdue est restaurée partiellement par les équations de stabilisation.

En définitive, le bloc a perdu un peu de sa

rigidité. Ce n'est pas le seul moyen d'atteindre ce but.

- Soit, enfin, par collocation:

Dans cette méthode on ajoute à la tendance **A.x** un vecteur des systématismes **s**, autrement dit on résout un sytème:

$$A.x + s = m - e \quad \text{avec:}$$

$E(s) = 0$, Les systématismes sont considérés comme aléatoires de moyenne nulle

$E(e.e^T) = \sigma^2$,

$C = E(s.s^T)$, fonction covariance du système,

$E(e.s^T) = 0$, les erreurs accidentelles et systématiques ne sont évidement pas corrélées.

On remarquera immédiatement l'analogie avec les premières méthodes:

$s = B.y$ par conséquent la fonction covariance est

$$C = B.\sigma^2.B^T,$$

On considère habituellement que le choix de C n'est pas crucial, par conséquent le choix de B ne devrait pas l'être non plus, ce qui paraît pour le moins curieux.

On a utilisé les inconnues de systématisme de M.DUCLOUX parce qu'elles étaient associées au programme de production FAISCEAUX. Il était facile, par des compensations libres, de détecter les "résidus" des systématismes résiduels sur les points de vérification. On a calculé leur valeur moyenne quadratique d avec ou sans les inconnues de systématisme sur un certain nombre de chantiers (on trouvera quelques résultats plus loin).

Par expérience on a remarqué qu'il était toujours très favorable de diminuer les poids des observations qu'on savaient biaisées pour obtenir de meilleurs résultats sur les écarts quadratiques moyens sur les points de vérification.

Il s'agit donc d'une variante dégradée de la méthode de collocation pour tenir compte des résidus de résidus de systématismes, ayant résistés à un premier traitement, lui même tout à fait légitime, qu'on n'était pas parvenu à éliminer.

B était confondue avec la matrice identité I ce qui ne peut donner que des résultats très approchés, cette matrice n'est pas considérée comme particulièrement creuse puisque les systématismes aux mêmes points de "Von Grüber" d'un cliché à l'autre sont corrélés.

La seule justification, en dehors des résultats, était qu'il ne s'agissait que des parties résiduelles des systématismes déjà corrigés.

Les coefficients des modèles des mesures aéroportées sont les inconnues de systématisme de ces mesures; en effet, les mesures aéroportées ne peuvent pas, dans le cas général, être introduites directement dans les calculs de compensation, elles doivent être complétées par un modèle

physique.

Les mêmes observations peuvent être faites au sujet de ces modèles, on verra que certains paramètres ne peuvent pas être déterminés, le modèle est alors incomplet et biaisé et cela est inévitable.

B est alors incomplète, on a employé la même méthode pour tenir compte de ces défauts.

7.3.LA METHODE UTILISEE DANS LA PRATIQUE COURANTE DE LA PRODUCTION.

En principe, après une première serie d'itérations et le calcul des résidus, lorsqu'une solution est atteinte, on peut estimer le facteur de variance a posteriori par:

$$\sigma = \sqrt{1/(n-j) \sum_{i=1}^{i=n} p_i . v_i^2}$$

n étant le nombre d'équations et
j le nombre d'inconnues; si les poids donnés a priori sont convenables σ ne doit pas différer de 1 car la variable:

$(n-j).\sigma^2/\sigma_o^2$ obéit à une loi du Khi deux à n-j degrés de liberté; comme, en général, le nombre des degrés de liberté est élevé on a:

$$\sigma \approx 1 \text{ (Test de Fisher Snédécor)}$$

Malheureusement il n'est pas possible d'estimer correctement les écarts-types a priori, dans une compensation globale de mesures hétérogènes, par ce moyen très simple.

Pourtant on procèdait généralement de la manière suivante:

Un premier calcul était effectué en utilisant des poids standards pour les différents catégories de mesures. Puis on relevait les résidus moyens quadratiques d'ajustement sur les différentes catégories de mesures qu'on adoptait comme écarts-types "a priori". On sait que cette manière est incorrecte et très controversée, elle est pourtant universellement employée.

Dans le cas qu'on va traîter les choses seront encore plus compliquées puisqu'on ne disposait d'aucune donnée préalable concernant les mesures aéroportées. M.HOTTIER a proposé une méthode d'appréciation des écarts-types "a posteriori" par des simulations qui imposent le bruitage des mesures en autant de calculs qu'il y a de catégories de mesures dont on veut estimer l'écart-type. Les résultats ne permettent pas, apparemment, de savoir s'il subsiste des systématismes dans les mesures traîtées. De plus les premiers résultats significatifs n'ont été connus que très récemment (1989). On avait dû procéder différemment, on

expliquera comment.

7.4.LA METHODE DE CALCUL DES POIDS SELON MM HOTTIER ET KOPLICKU.

On sait qu'après une compensation par les moindres carrés les résidus sont exprimés par la relation:

$$v = -(I - A.(A^T.p.A)^{-1}.A^T.(e + s)$$

I étant la matrice identité de dimensions n.n
n étant le nombre total des observations
p étant le poids donné aux observation dans la compensation.

Les autres notations ont déjà été employées.

La matrice multipliant (e + s) est symétrique idempotente mais singulière, il n'est donc pas possible de connaître ces valeurs, par ailleurs elle est de très grande taille, le rang de v peut dépasser plusieurs milliers en aérotriangulation analytique.

M.HOTTIER propose de calculer des segment de la trace de la matrice idempotente, ces segments correspondent aux différentes catégories de mesures, il a trouvé le moyen d'éviter son calcul en remarquant que:

$$p_1.\Sigma\, v^2_1/n_1 = \alpha_{11}.p_1.\sigma^2_1 + \alpha_{12}.p_2.\sigma^2_2 + \ldots + \alpha_{1c}.p_c.\sigma^2_c$$

$$p_2.$$

$$\ldots.$$

$$p_c.\Sigma\, v^2_c/n_c = \alpha_{c1}.p_1.\sigma^2_1 + \alpha_{c2}.p_2.\sigma^2_2 + \ldots + \alpha_{cc}.p_c.\sigma^2_c$$

Où p_i sont les poids des mesures i
v_i les résidus des mesures i
n_i le nombre des mesures i

Toutes ces valeurs sont connues; les sommes des carrés des résidus $\Sigma\, v^2_i$ sont donnés par le programme de calcul à l'issue d'une compensation.

On cherche à calculer les σ_i écarts-types "a posteriori" des mesures i.

Les α_{ij} sont des coefficients positifs inférieurs ou égaux à l'unité qui sont déterminés en bruitant les mesures et en faisant autant de compensations avec autant de mesures bruitées qu'il y a de σ_i inconnus.

On calcule ainsi l'incidence de la géométrie du système sur la valeur de la somme des carrés des résidus.

On a remarqué que le groupe des mesures faites sur les clichés indicé c placé le dernier est très largement dominant, si on lui donne un poids très fort par rapport à ceux donnés aux autres mesures on aura:

$$\sum_{1}^{nc} v^2c/nc \approx acc.\sigma^2c$$

$$\text{et} \quad acc = \frac{n-i+7}{n}$$

avec n: nombre total des mesures et
i: nombre total d'inconnues

Ce calcul permet d'approcher de très près la valeur de l'écart-type des mesures faites sur les clichés, mais il semble presque certain que c'est la précision interne qu'on a obtenu et non pas l'exactitude, alors que c'est cette dernière qui devrait être entrée dans les calculs ultérieurs.

La méthode de M.HOTTIER est trop récente pour être entrée dans les ateliers de production, une remarque importante doit par contre être faite:

La géométrie des chantiers photogrammétriques reste assez semblable d'un bloc à l'autre, les points de Von Grüber sont toujours placés aux mêmes endroits, comme le but de ces calculs est de séparer les effets dûs à la géométrie des mesures des blocs des effets de leur dispersion propre on peut normalement espérer que les valeurs des a_{ij} pourront être déterminées une fois pour toutes pour les blocs les plus courants.

7.5. LA METHODE UTILISEE.

Les essais préliminaires qu'on avait pu faire avaient montré de façon très nette que l'écart-type des mesures clichés pouvait être approché par un calcul de compensation libre il était voisin de celui qu'on obtient par le calcul de:

$$\sigma c = \frac{v^T c . p . vc}{n-i+7}$$, v étant le vecteur des résidus des clichés.

Ce résultat était celui trouvé par M.HOTTIER

Malheureusement il ne donne pas toujours des résultats optimaux sur les point de vérification car il donne un poids trop fort aux mesures des clichés.

On a remarqué que les poids à affecter aux mesures des appuis terrain sont toujours supérieurs à ceux qu'on donnerait d'après les résidus d'ajustement calculés par le programme FAISCEAUX.

Ceci est probablement dû au fait que, dans ce programme, le calcul des points se fait sans l'intervention des mesures de terrain, par conséquent les résidus aux points d'appui sont majorés et leurs poids minorés. La majoration va jusqu'au doublement du résidu réel.

Faudrait-il augmenter le nombre des paramètres de systématisme pour mieux corriger les mesures faites sur les

clichés et modifier le programme pour qu'il tienne compte des mesures terrain ?

C'est un problème auquel on n'a pas tenté de répondre.

Si, comme on l'a fait, on compense une catégorie de mesures sans que les autres puissent agir de façon significative sur elle on obtient sa précision interne; ce n'est possible, en toute rigueur que pour les mesures faites sur les clichés.

Profitant de la particularité du programme FAISCEAUX de calculer les résidus de compensation sur les points d'appui de terrain sans tenir compte des mesures terrain elles-mêmes on a pu approcher la précision des mesures de terrain par le même moyen.

Pour les points d'appui de terrain, dont les coordonnées sont calculées sans tenir compte des valeurs terrain pour éviter, entre les points d'aérotriangulation à déterminer et les points au sol connus, l'effet de "matelas" qui apporte au bloc des déformations à l'emplacement des points d'appui, qui ne sont pas suivies par les points voisins qui ne sont pas appuyés.

L'effet "de matelas" est mal ressenti par les personnes chargées de la restitution; dans le premier cas, la part prise par les mesures "dépondérées" est de l'ordre de quelques dix-millièmes, et dans le second de l'ordre de 4 à 5 % . Par contre cette méthode tombe, bien entendu, en défaut pour les mesures aéroportées pour lesquelles il n'est pas possible de déterminer σ_o sans que la valeur calculée de l'énergie emmagasinée par les mesures "dépondérées" ne soit du même ordre de grandeur que l'énergie des mesures dont on veut déterminer la précision interne. Elle tomberait aussi en défaut si les résidus aux points d'appui étaient calculés de façon habituelle.

En outre, lorsqu'on tient compte des mesures faites sur le terrain il est facile, à tout opérateur débutant d'obtenir un résultat aussi bon qu'il le désire par l'examen des résidus sur les points d'appui.

Par contre, dans le programme exploité actuellement, si on donne un poids très fort aux mesures des appuis de terrain et un poids très faible aux autres mesures on obtient un résidu quadratique moyen dont la valeur approche l'écart-type "a posteriori" qui est surtout composé de l'erreur d'identification du point, ceci n'est donc valable que pour les points naturels.

Plusieurs précautions préalables ont dûes être prises :

Il convient que les observations utilisées ne comportent plus de fautes qui provoqueraient une inflation des carrés des résidus, et cela sans éliminer des points non fautifs. C'est un exercice très délicat, qui doit être mené avec beaucoup d'honnêteté, mais qui a permis de cerner le rôle des points et leur niveau d'efficacité en fonction de leur position.

Il faut "dépondérer"correctement les mesures étrangères au groupe intéressant, mais sans rendre le système singulier et, donc, impossible à résoudre.

On a procédé par tâtonnement en essayant, pour un poids unité donné aux mesures retenues, des poids de 10^{-2}, 10^{-4}, 10^{-6} aux autres mesures, pour ne retenir que 10^{-2}, il semble en effet qu'on atteigne un minimum de la somme des carrés des résidus des

mesures intéressantes, sans buter sur des difficultés de résolution, et sans obtenir des valeurs aberrantes pour les sommes des carrés des résidus des autres mesures. [13 WICHERN].

On a déterminé en deux tours de calcul l'écart-type σ_c sur les clichés, le biais résiduel des mesures des clichés d, et l'écart-type sur les points d'appui σ_a.

Les essais ont été réalisés sur plusieurs chantiers choisis au fil de la vérification entreprise, et, d'abord, parmi les chantiers ayant bénéficié de mesures aéroportées.

AMIENS II : clichés au 1/4.000ème, mesures sur le terrain en nombre et de qualité insuffisante pour cette échelle, on a dû utiliser les coordonnées de points photographiques d'une mission plus ancienne pour compléter les points restants, en outre, le vol avait été assez agité en sorte que deux bandes n'étaient pas liées, elles n'avaient aucun point commun pour assurer la liaison entre elles sur une partie du parcours, il a fallu ajouter une bande, d'un vol plus ancien, photographiée à une autre échelle, pour les joindre par des points communs et exploiter les mesures. Par contre les mesures G.P.S., objet de l'essai, se sont révélées, heureusement, excellentes.

La SOUTERRAINE : clichés au 1/30.000ème pour une altitude de vol de 5.000 m. Mesures terrain très surabondantes et repiquées, mesures statoscopes réelles, mesures G.P.S. simulées à partir des mesures terrain surabondantes et des mesures statoscopes.

AMIENS II

Erreur-moyenne quadratique interne des points terrain 0,36 m
Biais quadratique moyen des groupes de mesures terrain-clichés:
d =0,64 m

On remarquera que l'erreur moyenne quadratique interne des points terrain est assez élevée, elle correspond à un écart-type de 0,20 m par coordonnées, ce qui peut être dû à un mauvais repiquage, à l'ancienneté et à la rareté des points d'appui.

LA SOUTERRAINE

Erreur moyenne quadratique interne des points terrain 0,72 m correspondant à 0,41 m par coordonnée.
Biais entre les groupes de mesures terrain --> clichés
avec les paramètres de systématisme d= 1,03 m
sans les paramètres de systématisme d= 8,04 m

On a remarqué dans les deux exemples précédents l'importance de l'erreur moyenne quadratique interne des mesures terrain, elle semble dûe au repiquage de points anciens pour la Souterraine et Amiens, avec, comme cause aggravante, pour ce dernier chantier, l'ajout de points purement photographiques pour combler le manque de points terrain. Il semble que l'utilisation de points naturels introduise une distance de moyenne nulle mais d'écart-type assez élevé entre le point topographique et le point photographique, qu'on ne devrait pas retrouver sur les chantiers dont les points d'appui ont été balisés; on a vérifié cette hypothèse sur les chantiers expérimentaux de St Mandé-Vincennes

et de Grandmaisons.

L'étude a été poursuivie sur tous les chantiers étudiés et sur de nombreux chantiers de production.

Bien entendu les valeurs trouvées sont des approximations, en grande partie conventionnelles, en raison du poids de 0,01 adopté pour "dépondérer" les mesures étrangères à celles dont on cherche l'erreur moyenne quadratique interne σ_o. Cette valeur correspond à un optimum obtenu après de longs tâtonnements elle est caractérisée, pour les mesures externes, par un minimum peu marqué de la somme :

$$\Sigma = (r^2_x + r^2_y + r^2_z)^{1/2}$$

Exemple :

p =	0,1	0,01	0,0001
Σ =	0,78 m	0,72 m	0,78 m

Ceci pour des points d'appui.

Toutefois, on remarquera que les résultats restent très comparables d'un chantier à l'autre pourvu qu'on ne change pas le modèle des systématismes.

L'efficacité de la méthode, dans l'appréciation des biais d non modélisés, apparaît lorsque les calculs sont faits avec ou sans les systématismes DUCLOUX [40] :

1,03m pour 8,04m à la Souterraine
1,87m pour 7,26m à Magnac-Laval-la Souterraine

Ce qui ne signifie pas que ce calcul soit très rigoureux pour autant; il faut, toutefois, bien considérer que ce ne sont que des valeurs relatives des écarts-types a priori que l'on cherche, et non des valeurs absolues très précises.

Cette manière de faire n'étant pas à l'abri des contestations on a procédé aussi d'une autre manière:

Il est facile, lorsqu'on dispose d'un réseau très dense de points d'appui et de points de vérification, de trouver, par tâtonnements les rapport qui existent entre deux catégories de mesures.

1°/ Dans une compensation libre on détermine la valeur de σ_c:

$$\sigma_c \approx \sqrt{\left(\sum_{1}^{c} v^2_c/(n-i+7) \right)}$$

2°/ Dans une seconde compensation faite en l'absence des mesures aéroportées en donnant un poids aux mesures clichés donné par:

$$p_c = 1/\sigma_c^2$$

On essaie des valeurs des poids des mesures de

terrain voisines de celles trouvées précédemment; il est facile d'optimiser cette valeur en observant les résultats sur les points de vérification.

On sait que les écarts quadratiques moyens obtenus sur les points de terrain sont la somme quadratique moyenne des erreurs propres à la détermination du point et de l'erreur quadratique moyenne de l'identification du point. Cette dernière erreur étant largement prépondérante lorsqu'il s'agit d'un point naturel.

La précision de détermination photogrammétrique d'un point de terrain non balisé est donc plus grande que celle qu'on a trouvé.

3°/ Dans les compensations suivantes on associe:

- Les mesures photographiques avec un poids p_c.

- Un jeu de mesures d'appui **minimal**, qui dépend étroitement du modèle adopté pour les mesures aéroportées: par exemple, pour un bloc homogène et le modèle des mesures G.P.S adopté un seul point d'appui connu dans ses trois coordonnées suffit. Pour le même bloc et avec le modèle des mesures de capteur de pression adopté il faudrait deux appuis connus en planimétrie et un appui connu en altimétrie, dans les deux cas avec un poids p_a déterminé au calcul précédent.

- Les mesures aéroportées en essayant des poids autour de valeurs probables comme on a fait en 2°/

Cette méthode, assez peu élégante il est vrai, donne des résultats très stables d'un bloc à l'autre.

Tous les essais qu'on a pu faire, une fois connus les poids relatifs à adopter, nous ont amené, tout naturellement, à retenir le mode opératoire plus proche de la pratique actuelle suivant:

- Donner aux mesures clichés un poids plus faible que celui tiré de la compensation libre et de la formule citée plus haut.
- Donner aux appuis un poids plus fort qu'on pourrait tirer d'un calcul préliminaire traditionnel du programme FAISCEAUX. Ceci étant probablement dû a la méthode de calcul des résidus des points de terrain.
- Donner un poids faible aux mesures aéroportées dans les premières iterations.
- Relever, après le premier tour de calcul les résidus moyens quadratiques d'ajustement $\sigma \approx \sqrt{(\Sigma v_i^2/n_i)}$ et les adopter comme écarts-types "a priori" d'une seconde itération, sauf pour les clichés pour lesquels on adoptera, en fonction de la qualité des résultats sur les points de vérification, un écart-type "a priori" compris entre 7 et 17µm.
- Si le nombre des appuis au sol est faible on leur donne un poids plus fort; inversement on donne un poids plus faible aux mesures aéroportées, car, dans le cas contraire, les

appuis n'apporteraient qu'un faible concours à la compensation alors qu'ils sont de première importance.

- Si le nombre des appuis au sol est important on leur donne un poids s'approchant de la valeur obtenue dans le tour de compensation précédent, on fait de même avec les mesures aéroportées qui interviennent alors très favorablement.

Bien entendu l'emploi de mesures aéroportées visant à économiser les points de terrain, il s'agit surtout de trouver, là encore, un compromis acceptable.

On a résumé la méthode employée dans le schéma d'action suivant :

NOMBRE DES APPUIS	POIDS DES APPUIS	POIDS DES MESURES AEROPORTEES
Diminue	Augmente	Diminue
Augmente	Diminue	Augmente

Ces dispositions sont justifiées par le fait que lorsque le nombre des appuis diminue l'énergie transmise au réseau diminue aussi, effet qui peut être contrecarré en augmentant leur poids; les mesures aéroportées dont le référentiel et les paramètres du modèle sont donnés par les points d'appui ont des systématismes plus importants, de ce fait leur poids doit être réduit. Inversement, si les points d'appui sont très nombreux, les référentiels et les modèles des mesures aéroportées seront corrects, il sera alors possible d'augmenter leur poids relativement à celui des appuis, qui peut ,sans conséquences, être ramené à sa valeur réelle, puisque les systématismes du bloc peuvent être redressés par les mesures aéroportées. Si ces dispositions étaient adoptées il faudrait en tirer les conséquences suivantes:

Pour augmenter le poids des appuis, lorsqu'ils sont peu nombreux, et que cela corresponde à la réalité, il serait nécessaire de les signaler par des balises, car les points naturels deviendraient, forcément, de précision insuffisante pour certain travaux.

On note que:

A/ Le manque de points d'appui en nombre ou en précision introduit des biais dans la solution.

B/ Moins on a de points d'appui, plus il faut leur donner un poids élevé qui soit justifié par leur précision(balisage), et alléger le poids des mesures auxiliaires, dont le biais et les défauts du modèle se feraient sentir si on ne prenait pas cette précaution.

C/ A l'inverse, en présence de nombreux points d'appui, le poids des mesures aéroportées peut être augmenté, puisque leur erreur moyenne quadratique interne est faible et que les problèmes dûs à l'imprécision du référentiel et du modèle

sont résolus. [voir 19 SHWARTZ, 20 FRIESS].

Ce schéma d'action peut être mis en oeuvre

A condition :

. D'avoir éliminé <u>toutes</u> les fautes.

. De travailler sur le même réseau de points et de relations clichés, afin de faire des comparaisons valables.

En dehors des points d'appui préalablement balisés indispensables, à notre sens, lorsqu'ils ne sont pas assez nombreux, la précision des mesures GPS paraît supérieure à celle des points d'appui naturels, parce que le point mesuré est confondu avec le sommet perspectif, alors que pour les points d'appui naturels le point topographique et le point photographique sont certainement distincts.

D/Pour les points d'appui balisés les conclusions seraient, évidemment, inverses dans la mesure où ces deux points sont confondus. Le coût et les contraintes du "prébalisage" feront que chaque fois qu'il sera possible de s'en passer on l'évitera; sauf lorsque les appuis seront peu nombreux. (C'est, finalement, en gros, ce qui se faisait déjà).

E/ Dans l'état actuel des méthodes de calcul, il paraîtrait plus efficace de reporter cette indécision, quand elle existe, sur les mesures faites sur les clichés pour combattre et redresser les déformations systématiques du réseau photogrammétrique, et parce que les mesures de terrain représentent l'élément de base de la comparaison par lequel on apprécie la qualité de l'ajustement.

Ceci a d'ailleurs été confirmé par les essais de Monsieur Jean-Yves LASCAUX [5] déjà cités.

7.6. LA PRESENCE DES SYSTEMATISMES DANS UNE COMPENSATION PAR LES MOINDRES CARRES

Il est courant d'admettre que la somme des carrés des résidus doit être minimale pour que le résultat soit le meilleur possible, c'est le principe sur lequel s'appuie la compensation par les moindres carrés.

De deux calculs on préfèrera celui donnant la somme des carrés des résidus la plus faible, qui est la solution la meilleure, lorsque les mesures ne sont pas biaisées.

Si le réseau photogrammétrique seul comporte des systématismes qui n'ont pas été correctement modélisés, il est déformé.

Afin de parvenir à une position non (ou moins) déformée, il faudra appliquer des efforts à ce réseau, donc lui faire emmagasiner de l'énergie.

L'équivalence ou la fiction mécanique sont bien utiles pour faire comprendre que pour parvenir à une solution meilleure il faudra que la somme des carrés des résidus, et par conséquent l'énergie emmagasinée, augmentent, ce qui est contraire aux idées habituellement reçues, et, en tous cas, au principe de la méthode

du S.T.N, sous la direction de M.Ch.MEYER [5 LASCAUX] et en dehors de la présente étude, que le rapport des écarts-types a priori qui était jusqu'alors utilisé, et qui était très largement justifié par les écarts-types a posteriori, calculés sur des dizaines de blocs de toutes tailles, gagnait à être modifié en augmentant le poids des mesures de terrain, au détriment des mesures faites sur les clichés, les résultats, aux points de contrôle étaient facilement améliorés, alors que la somme des carrés des résidus d'ajustement augmentait et que l'énergie emmagasinée par le réseau augmentait de la quantité nécessaire pour redresser le bloc.

7.7. CRITERE DE LA QUALITE D'UNE COMPENSATION.

Les résidus moyens quadratiques d'ajustement des mesures externes peuvent être amenés, par une pondération convenable, à toute valeur qu'on voudra bien fixer à l'avance de 0 (zéro) à la valeur maximale obtenue lorsqu'on donne à la mesure un poids négligeable.

Les résidus moyens quadratiques d'ajustement des mesures faites sur les clichés (mesures internes) ne permettent en aucun cas de prévoir la qualité du produit final. Tant qu'il subsiste des systématismes résiduels leur accroissement n'est pas le signe d'un résultat plus mauvais on a pu constater le contraire (Cf les essais de blocs avec ou sans bandes transversales).

Par conséquent, dans l'état actuel des choses et du programme, les écarts quadratiques moyens aux points de contrôle terrain s'imposent donc normalement comme critère d'appréciation de la qualité d'un ajustement, car ils ne participent pas à la compensation.

Ils représentent, toutefois, un maximum puiqu'ils résultent de la composition de l'erreur de détermination photogrammétrique et de l'erreur commise sur la détermination du point de terrain sauf si cette dernière est très précise par rapport à la première(Cas des points balisés).

On pourrait, en modulant les poids, rapprocher la solution soit du terrain, si les points d'appui étaient très précis, soit du réseau photogrammétrique, si on doutait de leur qualité, soit des mesures aéroportées, si ils étaient en nombre insuffisant. On saurait, alors, que le biais dominant viendra, soit du terrain, la restitution sera plus difficile, soit du réseau photogrammétrique, la restitution sera alors confortable et le rapprochement avec le terrain poserait des problèmes délicats de raccords entre les modèles, soit des mesures aéroportées, on aurait alors des problèmes liés au système de référence légèrement différent de celui du terrain et aux défauts de modélisation inévitables, voir [17 MADER].

Compenser c'est, précisément, l'art d'éviter tous ces inconvénients, par un compromis judicieux.

Ce compromis est facile à réaliser lorsqu'on n'utilise que deux catégories de mesures, il devient plus délicat avec trois ou quatre.

" De toutes les façons la compensation par les moindres carrés traite de la même manière les erreurs accidentelles et les erreurs systématiques, puisque c'est la somme des carrés des

de compensation par les moindres carrés, si on ne prend pas la précaution de changer ce principe par celui de l'énergie minimale emmagasinée par le système; notamment lorsqu'on fait des compensations "robustes".

La somme minimale des carrés des résidus ne pourrait être un critère de choix d'une solution, que si les mesures n'étaient pas biaisées ou fausses, si elles le sont il faut trouver autre chose, or on sait que nos mesures purement photogrammétriques restent biaisées, les mesures aéroportées aussi même si des modèles de plus en plus fins sont introduits dans les calculs, il restera toujours une partie irréductible, cette partie restant variable d'un chantier à l'autre sans qu'on sache pourquoi. Il est probable que les mesures aéroportées, en raison même des simplifications apportées aux modèles sont, au moins, légèrement biaisées par rapport aux mesures de terrain, qui serviront de référence et seront réputées sans biais.

Les principes des méthodes de compensation dites "robustes" peuvent être employés, même si on n'utilise pas ces méthodes elles-mêmes, dont l'objectif est, le plus souvent,de rechercher automatiquement les fautes. Elles sont fondées sur l'idée très simple de minimiser, non plus la somme des carrés des résidus, mais une fonction des résidus.

L'analogie mécanique peut venir illustrer très simplement ces principes en disant qu'on minimisera l'énergie emmagasinée par le système au cours de la déformation et prévoir une fonction:

Force= f(déformation) alors que dans la compensation par les moindres carrés on avait une stricte proportionnalité entre la force F et la déformation exprimée par le résidu d'ajustement r avec:

$$F = r/\sigma^2$$

Dans le cas où des systématismes sont présents, il faut, pour redonner une forme correcte au bloc, ou à la mesure biaisée, l'"assouplir" afin que les forces extérieures puissent lui ou leur apporter des déformations contraires aux systématismes présents, cela ne peut se faire qu'en augmentant l'écart-type a priori des mesures biaisées, ou en diminuant leur poids, ou en augmentant le poids des mesures non biaisées.

Ces pratiques avaient et ont encore une fort mauvaise réputation tant qu'un support théorique solide leur manquait. Les théories actuelles de l'estimation biaisée reviennent à les justifier.

Evidemment en modifiant les poids des différentes mesures au gré de chacun, on peut obtenir tout résultat qu'on désire; le cas précis qui nous intéresse est entièrement différent puisqu'on dispose d'une "vérité terrain" difficilement contestable, représentée par de très nombreux points de contrôle, le fait d'obtenir une somme des carrés des écarts minimale sur ces points, pour un certain rapport des poids entre les différentes mesures impliquées dans la compensation, apporte une justification suffisante, puisqu'aucun choix n'est arbitraire, et qu'on dispose d'un critère permettant de choisir un poids plutôt qu'un autre.

Il a d'abord été vérifié, au Département des Canevas

erreurs accidentelles et systématiques qu'on minimise en donnant des poids, le plus souvent fixés par l'expérience.[18 KUBIK]"

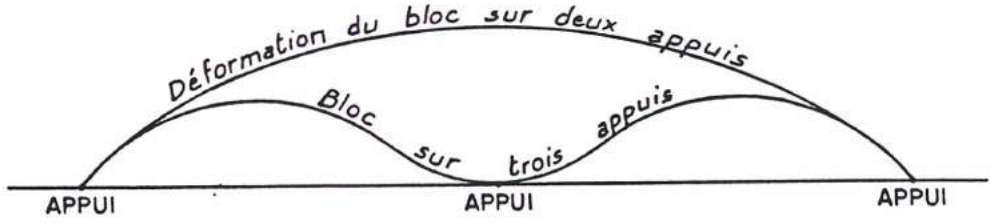
Or la répartitions des erreurs totales entre systématismes et erreurs de nature aléatoire dépend fortement de la position des points d'appui et des mesures aéroportées.

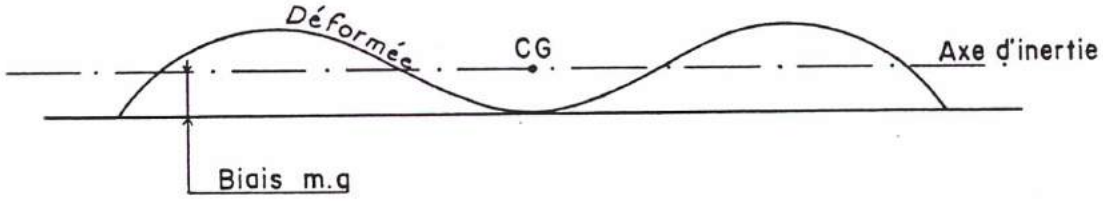
" En fait, minimiser la somme pondérée des carrés des erreurs accidentelles et systématiques ne résout rien, mais rend le problème totalement invisible à l'utilisateur. [18 KUBIK]"

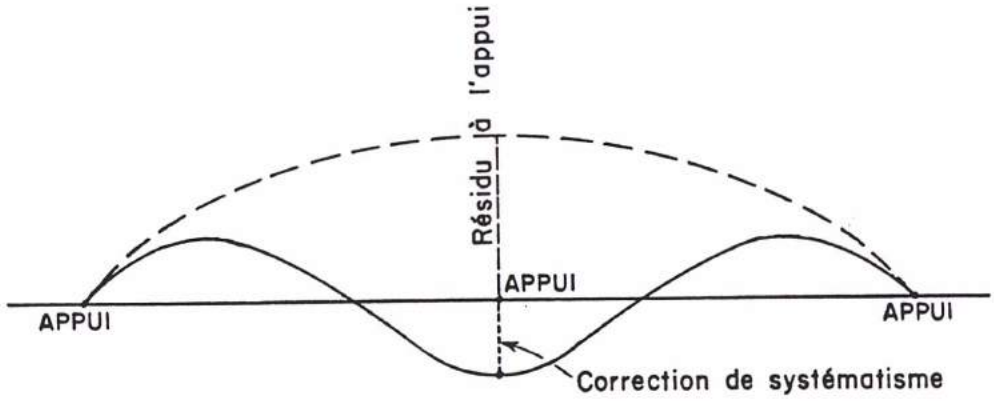
L'aide apportée par les mesures aéroportées est double: au-delà des appuis complémentaires qu'elles apportent, elles aideront à une meilleure définition de ces inconnues de systématisme, en permettant une détermination plus précise de leurs valeurs.

En outre, plus on disposera de points d'appui, ou de tout autre moyen économisant les appuis, notamment de mesures aéroportées, moins les résultats d'ajustement contiendront de systématismes résiduels; à la limite, avec une mesure par cliché, les "festons"résultants de l'ajustement d'un systématisme d'ensemble non modélisé seront effacés; or c'est ce qu'apportent, au moins, les mesures aéroportées .Voir la figure 7.

Figure 7


Déformation du bloc sur deux appuis
Bloc sur trois appuis
APPUI
APPUI
APPUI


Déformée
CG
Axe d'inertie
Biais m.g


Résidu à l'appui
APPUI
APPUI
APPUI
Correction de systématisme

8.
LA MESURE DE LA HAUTEUR DES SOMMETS PRESPECTIFS PAR UN TELEMETRE LASER

8.1. GENERALITES

La mesure simultanée des hauteurs des points de vue des clichés par un télémétre laser et des mesures d'altitude relative par un statoscope prévue initialement n'a pas pu être réalisée dès les deux premières missions, le statoscope n'ayant pas fonctionné.

Ce n'est que sur le troisième chantier qu'il a été possible d'employer un capteur de pression CROUZET de conception différente, le type 44 associé à un télémétre laser.

8.2. DESIGNATION DES CHANTIERS " LASER SEUL"

Les deux premiers vols se sont donc réduits aux mesures laser seules qu'on a tenté d'exploiter surtout pour connaître la précision réelle du télémètre employé par l'I.G.N et pour préparer les essais ulterieurs. En effet on ne connaissait que fort peu de choses sur la précision de cet instrument et on a dû faire appel à la littérature étrangère pour estimer les résultats qu'on pouvait en attendre.

8.2.1. VOL DE MAGNAC-LAVAL LA SOUTERRAINE.

Ce vol a été effectué en juin 1986 à une altitude de 4.900 m, il comportait 92 clichés et quatre bandes contiguës. Les images, de très bonne qualité, étaient prises à l'aide d'une chambre RC10, de 152 mm de focale; l'échelle moyenne des clichés était du 1/30.000e comme pour tous les travaux de vocation de l'IGN sur le territoire français. Voir le schéma du vol sur la figure 8.

8.2.2. VOL D'ARGENTON SUR CREUSE BOURGANEUF.

Cette prise de vue qui recouvrait entièrement la précédente, était nettement plus importante. Ce chantier comportait six bandes de vol et 194 clichés. La prise de vue était faite avec la même chambre à une altitude comprise entre 4.300 et 4.700 m, l'échelle moyenne des clichés était aussi du 1/30.000e.

Tous les détails technologiques de ces deux prises de vue étaient ceux des missions classiques de vocation de l'I.G.N.

MAGN. LAVAL LA SOUTER

ESSAIS DU LASER SEUL SUR 94 CLICHES

Figure 8

pour établir la carte de base au 1/25.000è et, notamment, un recouvrement longitudinal des clichés de 60 % et un recouvrement transversal de 15 %. Voir les figures 9 et 10.

8.2.3. VOL DE LA SOUTERRAINE

Ce vol étant commun à plusieurs essais on se reportera en ANNEXE IV C où il est décrit.

8.3. MODELES FONCTIONNELS DES MESURES DE HAUTEUR LASER.

8.3.1. CORRECTIONS APPORTEES AUX MESURES

On avait estimé les effets associés de la réfraction et de la constante de décalage vertical entre l'appareil de mesure et la chambre à :

Réfraction	- 0,95 m	
Décalage	- 0,25 m	(donnée S.A.A.Service des Activités Aériennes de l'I.G.N)
	- 1,20 m	

Soit - 2,40 m sur un trajet aller retour, les hauteurs variant assez peu, on n'avait pas fait de calcul plus précis, on verra pourquoi.

Les calculs des erreurs systématiques de réfraction avaient été appuyées sur les études de SAASTAMOINEN [21 & 22]

Par la suite, on s'était aperçu que, malgré ces corrections, il subsistait des erreurs systématiques non expliquées, variables d'un chantier à l'autre, mais toujours inférieures à la "largeur" du signal, qui était d'environ 18 ns(nanosecondes).

8.3.2. MODELE DES MESURES DE HAUTEUR LASER.

On espérait bien n'avoir à entrer aucun modèle pour les mesures de hauteurs laser, tel n'a pas été le cas, on s'était, pourtant basé sur des études étrangères, très solides dont on rappellera l'essentiel ci-après :

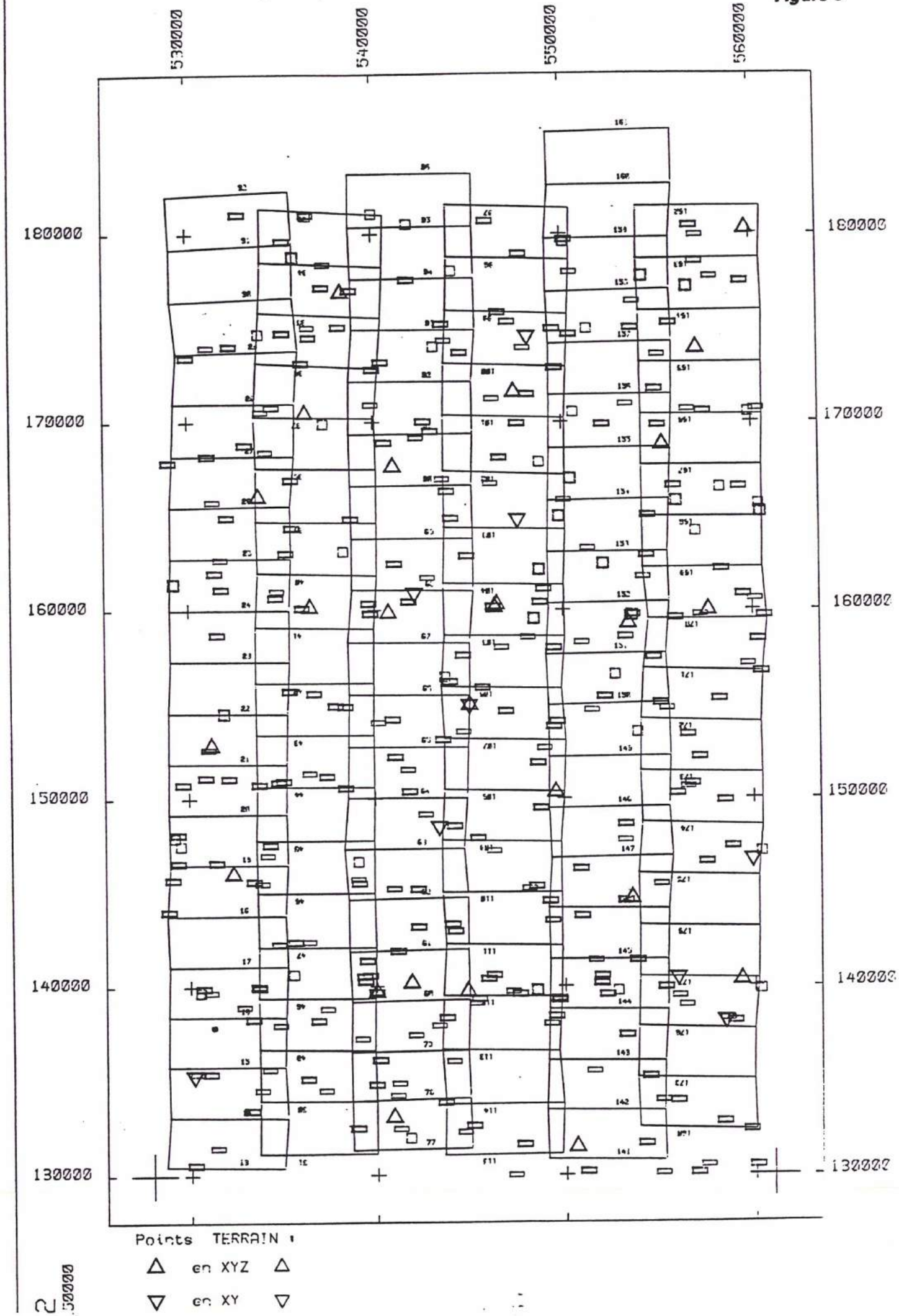
8.3.2.1. RECHERCHES ETRANGERES SUR LES MESURES LASER.

On va analyser trois publications, dont les résultats convergents nous avaient permis d'espérer un apport extrêmement substantiel des mesures de hauteurs par distancemètre laser.

Toutefois ces publications rapportaient des expériences dont l'objectif était différent de celui que l'on visait. lI était donc nécessaire de procéder à une interprétation des

ARGENTON BOURGANEUF ESSAIS LASER SEUL

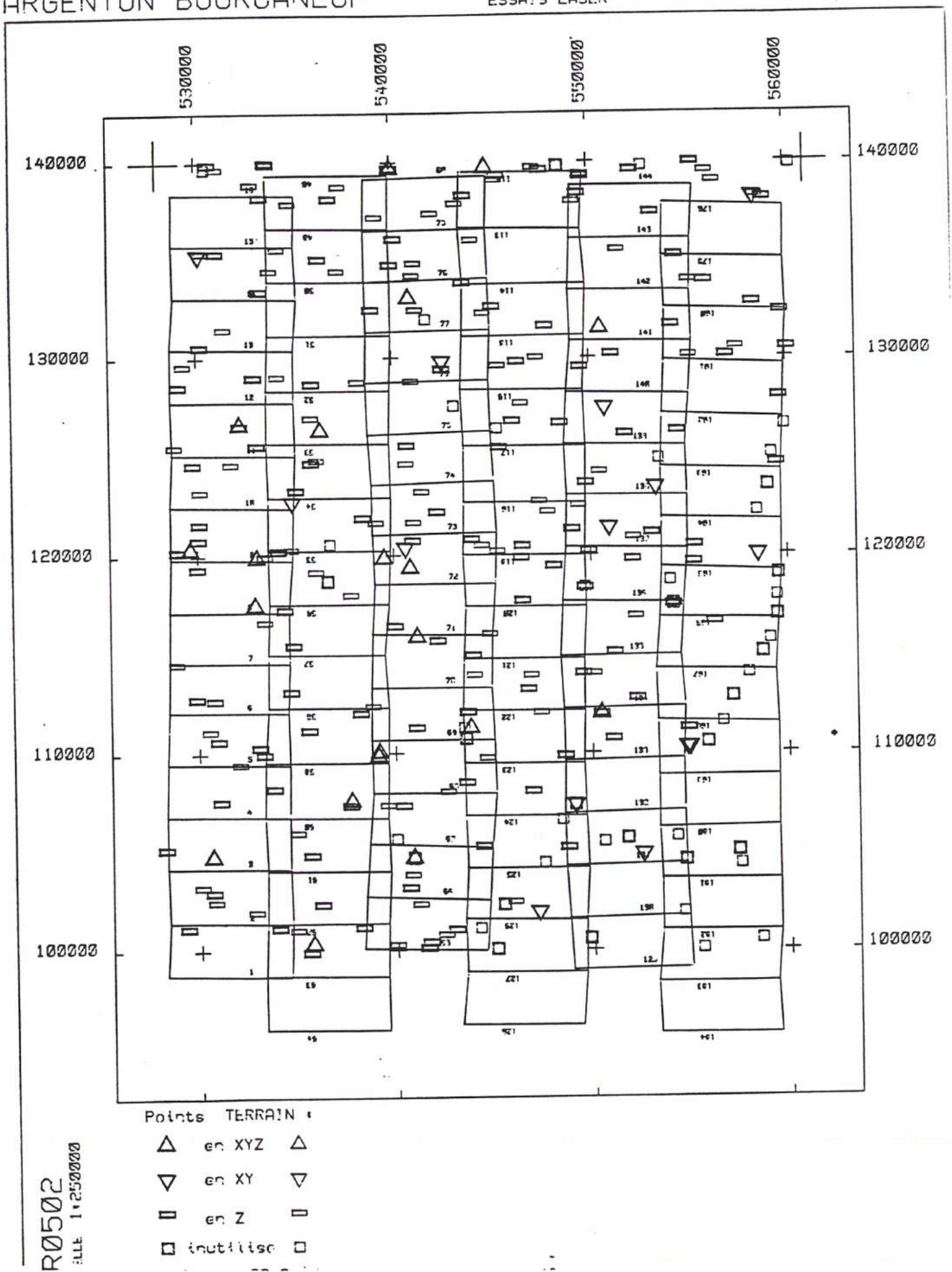
Figure 9



29-03-88

Figure 10

ARGENTON BOURGANEUF ESSAIS LASER



R0502

éléments publiés orientée différemment; en effet, dans les expériences rapportées ci-après, il s'agissait, le plus souvent, d'utiliser le laser aéroporté, associé à un système de navigation inertiel, dans le but de dresser des profils de terrain, des profils forestiers, ou des profils bathymètriques.

La photogrammétrie n'avait été utilisée que comme élément de comparaison, pour apprécier la précision des résultats, en parallèle, quand celà était possible, avec des levers au sol.

8.3.2.1.1.[REFERENCE 23 KRABILL & COLLINS].

Il s'agissait d'essayer un LIDAR héliporté à une altitude de 150 et 300 mètres, à une vitesse de 85m/sec (300km/hr) pour établir des profils topographiques de plaines d'inondation boisées, près de MEMPHIS dans le TENNESSEE.

Les essais avaient été conduits, d'abord, en période hivernale, les arbres étant dépouillés de leurs feuilles, puis en période estivale, avec tout leur feuillage.

Le laser utilisé servait à faire des démonstrations, dans les Agences de Bassins, de bathymètrie aéroportée et de fluorescence induite. Il permettait de connaître l'intensité du flux réfléchi sur une hauteur de 12 mètres au dessus du sol.

La localisation des profils du Lidar était faite en utilisant des prises de vues 35m/m des points d'impact de l'éclair lumineux, ces photographies étaient projetées sur les clichés aériens pour y définir la position de ce point; le rapport ne dit pas si ces points étaient marqués, ni comment. Le produit final était un plan au 1/480ème avec des cotes arrondies à 3cm (1/10ème de pied). L'impulsion Laser avait une largeur de 10 ns soit 3,00m; les expérimentateurs signalaient avoir obtenu deux retours du faisceau dans les arbres, que ce soit aussi bien en hiver qu'en été, l'un provenant du sommet ou de la houppe des arbres, l'autre du sol ou, plutot, de la végétation qui le couvrait.

L'écart quadratique moyen entre les mesures photogrammétriques et les hauteurs laser correspondantes était de 0,50m, cet écart pouvant descendre, en terrain découvert,à 0,12m ou 0,27m. Le diamètre de la tache laser est compris entre 0,38m et 0,58m ce qui semble traduire ce qu'indiquent les auteurs selon lesquels la définition horizontale du point réflecteur était de Huit (8) impacts pour 3,00m (± 1,50m).

Les auteurs avaient remarqué que là où la végétation couvrait totalement le sol le profil laser était décalé d'une hauteur constante, au-dessus du sol, défini par voie photogrammétrique, ou par les levers directs (Ce qui n'est tout de même pas la même chôse).

En outre, ils signalaient, et c'était important pour nous, que la majeure partie de l'énergie était réfléchie par la houppe des arbres et que l'énergie renvoyée du sol, là où la végétation était courte, était très faible.

8.3.2.1.2.[REFERENCE 24 SHREIER & al]

Les essais avaient été menés avec un distancemètre

laser dans l'infrarouge proche, voisin de celui de la CILAS, utilisé à L'I.G.N., pour vérifier la possibilité de relever des profils de terrain, et des profils forestiers.

Le laser était associé à une chambre photogrammétrique WILD R.C 10, et à un système de navigation inertielle LTN51, les hauteurs laser mesurées avaient été comparées à des mesures photogrammétriques, et à des mesures directes au sol.

Le système de navigation inertielle était un LITTON LTN51, modifié pour donner une plus grande résolution .

Les écarts moyens, s'apparentant à un biais de la mesure, relevés entre les profils laser et photogrammétriques étaient compris entre +1 et -24cm; les écarts types variant de 61 à 90cm, 95% des mesures était compris dans une fourchette de 1,80m.

Par contre, et celà est très important, les comparaisons en terrains couverts de végétation dispersée non continue, entre les levers directs laser, et les mesures directes au sol, les valeurs variaient, révélant un écart moyen (biais) de -0,18m pour un écart type de 0,16m ceci pour une altitude de vol de 1000m.

Dans les deux essais menés, la dimension de la tache laser, au sol, avait fait l'objet de mesures et de vérifications précises; le diamètre de la tache de demi-puissance était de 0,50m; au delà de 0,70m, la puissance reçue étaient inférieure à 10%. Ces données étaient très comparables à celles annoncées pour le télémètre laser de la CILAS, à moins que ces dernières n'aient été très surestimées, ce qui n'avait rien d'impossible.

La détermination de la position au sol de l'impact du tir laser était un problème difficile, mais il n'était rien par rapport à celui qui consistait à déterminer la position du même point sur les photographies aériennes prises simultanément, ou presque simultanément!

Au cours de cette expérimentation il avait été résolu en corrigeant les données des mesures inertielles, puis en convertissant les mesures laser "locales", dans le système de référence des photographies . C'est, évidemment, très vague pour des résultats aussi bons et, hélas, inutilisable pour nos besoins.

Des essais de mesures baromètriques associées aux mesures laser n'avaient pas donné de résultats, la pression n'ayant pas pu être correctement enregistrée.

Ce rapport était extrêmement intéressant car la comparaison entre les mesures de hauteurs laser et les mesures au sol, permettaient d'approcher la précision interne du système de mesure aéroporté, qui, comme on le voit, était très élevée. Si on peut faire confiance à ces résultats, les écarts constatés entre les mesures laser et les mesures photogrammétriques seraient imputables à ces dernières, ou, à tout le moins, pour la plus grande part, à leur précision interne .

8.3.2.1.3.[REFERENCE 25 MOREAU]

Le système employé était composé d'un équipement

inertiel FERRANTI FILS II, et d'un altimètre laser ACCI.

Les altitudes servant à la comparaison étaient mesurées directement au sol, par un nivellement géométrique direct.

Les auteurs avaient obtenu les résultats suivants:

| Ecarts moyens entre deux profils (biais) -0,33 m

Dûs, comme pour les expériences précédentes, à des réflexions dans la végétation,au dessus du sol .

| Ecart-type 0,65m

On espérait obtenir des résultats semblables.

Les auteurs signalaient,en outre,quatorze (14) écarts supérieurs à 2,00m survenant par groupes de trois (3). Le nombre total des mesures était de 759, il était suffisant pour que les auteurs se livrent à une étude statistique valable, et fort intéressante:

La fonction de répartition de ces mesures serait très éloignée d'une loi normale; sa courbe de densité de probabilité serait dissymétrique, ce que les auteurs traduisent, simplement sinon rigoureusement, par un écart type de 0,54m du coté positif et de 0,75m du coté négatif

8.3.2.2. MODELE ADOPTE D'APRES LES MESURES FAITES EN 1986 EN FRANCE PAR LE S.A.A.

En principe, il ne devrait pas être nécessaire de rechercher un modèle pour ce type de mesures, sur lequel on avait fondé de grands espoirs. Néanmoins on avait trouvé une référence bibliographique dans laquelle la nécessité de créer un modèle comprenant une constante inconnue se trouvait dans [LIGHT] mais l'exposé de cet auteur paraissait surtout spéculatif.

En effet, après correction de la mesure, de l'effet de la réfraction, et de la constante de décalage en hauteur entre le laser et la chambre, on devrait pouvoir les faire participer à la compensation, directement.

Or, malgré les résultats encourageants du premier chantier, tel n'a pas été le cas pour les chantiers suivants, pour lesquels on a été obligé d'admettre, avec réticence, qu'il fallait ajouter à la mesure corrigée une constante inconnue, probablement unique pour le chantier, c'est-à-dire ne dérivant pas dans le temps, ou peu.

De fait on a estimé qu'il était nécessaire de créer une inconnue par bande pour tenir compte des chantiers qui pourraient être observés à des dates différentes, et pour ne pas bouleverser l'ordonnance de la matrice normale qui est basée sur ce principe.

Si on note l la hauteur laser entrée dans le calcul, la hauteur h réelle sera :

| $h = l + L_b$
| L_b étant une constante par bande.

Il existe plusieurs explications à ce phénomène:

L'explication physique mettait en cause la quantité

d'énergie nécessaire, pour arrêter le comptage du temps qui s'écoulait entre le départ et le retour du flash laser. Cette explication nous avait été donnée par M. KASSER.

Le flash laser a une durée finie de 18 ns, le déclenchement de la mesure du temps n'est pas lui-même synchronisé au début de l'impulsion; au retour, la quantité d'énergie reçue dépend du pouvoir réflecteur du point d'impact, or ce point, tout à fait quelconque, va d'une surface asphaltée, à des terrains couverts de végétation, ou simplement absorbants. Si le comptage du temps de parcours aller et retour est arrêté lorsqu'une certaine quantité d'énergie est reçue, il existera un décalage de la mesure, variable selon la nature du point atteint et de l'état de l'atmosphère près du sol (brume de chaleur notamment). Bien entendu, il existe des possibilités de réglage du comptage du temps du télémètre laser. Il est possible qu'elles aient été mal exploitées, ou que la diversité des terrains ait été telle qu'aucun réglage ne puisse donner de résultats réellement satisfaisants, ou encore réellement efficaces. Dans ces conditions la "constante" pourrait varier, d'un chantier à l'autre, de 0 à 5,40 m.

A l'encontre de cette explication il convient de préciser que les trois chantiers où des mesures laser avaient été mises en oeuvre correspondaient au même lieu géographique, dans une région de collines moyennement boisées de la Creuse, et que, dans les trois cas, la constante L trouvée était différente, et même assez différente. Il faut noter, aussi, que dans la littérature spécialisée, faisant état d'expériences réelles, il n'était fait mention nulle part de cette constante, inconnue à ajouter aux mesures [23 KRABILL & al 25 MOREAU & al].

Selon MM.HOTTIER et EGELS cette constante par chantier serait inévitable et mal déterminée, elle pourrait avoir pour origine les systématismes mal corrigés des clichés qui provoqueraient un étirement du faisceau en hauteur. On a pu vérifier que lorsqu'on inactivait les inconnues de systématisme de DUCLOUX il se produisait, en effet, une modification de cette constante associée à une augmentation de l'écart-type. Dans les résultats qu'on a utilisés les inconnues de systématismes de DUCLOUX étaient, bien sûr, actives, dans le cas contraire les mesures laser seraient inutilisables.

8.4. CONTRIBUTION DES MESURES DE HAUTEUR PAR LASER DANS LES CALCULS D'AEROTRIANGULATION

Les contributions des mesures de hauteur par laser interviennent au même niveau que les appuis, puisqu'elles relient un point au sol, au sommet perspectif qui le surmonte :

$$((M-S)^T/hc).(dM-dS) + dL + hc + L - hm = 0 \quad (1X8)$$

soit huit termes en comptant le second membre.
Avec:

hc hauteur calculée $hc = \sqrt{(M-S)^T.(M-S)}$

d'après les coordonnées approchées du tour de calcul précédent.

hm hauteur mesurée par le laser.

dL Solution et correction à la valeur approchée L qui est la constante laser initialisée à 0 (zéro).

Cette relation d'observation est divisée par σ_{laser}, écart-type a priori des mesures de hauteurs laser. Elle est, ensuite, normalisée (voir le sous-programme présenté en ANNEXE), après normalisation, les termes sont entrés dans la matrice auxiliaire. Après résolution partielle de la matrice auxiliaire, ils participeront à la formation de la matrice normale en s'ajoutant au termes déjà présents.

Les relations d'observation normalisées mettent en oeuvre des inconnues de point M(6), des termes des inconnues de faisceaux S(6 sur 21) qui leur sont directement liées par la mesure de hauteur, des termes croisés (9) matérialisant aussi la liaison point cliché, des termes (2X3) de second membre, enfin des termes (6) en dernière ligne et en dernière colonne.

La résolution partielle de la matrice auxiliaire fait disparaître les inconnues de point en éliminant les trois premières lignes et les trois premières colonnes en les combinant avec les trois premiers termes des autres lignes. Le produit de cette combinaison s'ajoute aux termes diagonaux, et crée des termes de liaison qui n'existaient pas, jusqu'ici, entre les inconnues des faisceaux.

8.5. TRAITEMENT DES INFORMATIONS

Les mesures sur les clichés étaient faites au PSK1 de ZEISS (Stéréocomparateur de précision), normalement, comme pour les chantiers de production courants, sauf dans deux cas bien précis : les points d'impact laser, et les points communs à deux bandes perpendiculaires.

8.5.1. TRAITEMENT DES POINTS D'IMPACT LASER.

C'est un problème technologique mal résolu que celui de l'identification , sur le terrain , du point sur lequel le tir laser s'est réfléchi, on passera rapidement sur toutes les solutions envisagées par les auteurs [26 LIGHT] [2]; aucune n'est réellement praticable. La méthode qu'on avait employée correspondait au matériel utilisé décrit par M.R. BROSSIER dans [3]; il s'agissait d'un télémètre laser CILAS de conception et de réalisation déjà anciennes, utilisé dans les travaux courants d'A.P.R. En conséquence, elle ne saurait être généralisée à d'autres matériels. En effet, la chambre RC 10 était totalement

---

[2] Notamment il serait impossible de distinguer la réflexion du flash laser sur une photographie

indépendante du télémètre laser, lui-même solidaire d'une petite chambre 35 mm, qui lui était attachée de façon rigide, ce qui n'était pas le cas dans [26 LIGHT].

Ceci avait pour conséquence que, selon l'attitude de l'appareil, le point d'impact laser se déplaçait dans le champ du cliché pris par la chambre RC10.

Les déclenchements de la chambre RC10 et du tir laser n'étaient pas totalement simultanés, mais de très peu. La zone de l'impact du tir laser était photographiée par une chambre Camematic de 35 mm, le retard entre l'impulsion et le déclenchement de cette petite chambre était de 72 millisecondes, ce qui était considérable!

A l'occasion d'une vérification le S.A.A. avait proposé une valeur de 84 ms. Cette indécision est un facteur limitant de ce procédé, malheureusement ce n'est pas le seul. En effet, avant d'effectuer les mesures des coordonnées clichés, il fallait reporter le point d'impact du tir laser sur le cliché photogrammétrique 24X24cm pris par la chambre RC10.

La procédure mise au point était la suivante : report du repère central du cliché 35 mm appelé vignette sur les différentes vues : en effet, les vues 35 mm ne portaient aucun repère : celui-ci n'était vu que sur les premiers clichés "muets" précisémment destinés à ce repèrage. Il était donc nécessaire de reporter sa position sur les vignettes suivantes qui, seuls portaient l'image du terrain. De fait, on reportait pratiquement cette position au marqueur PUG , en superposant les bandes des clichés portant une image du **repère**, à celles des clichés portant les images du **terrain**, la coïncidence entre les deux clichés se faisant en superposant, sous fort grossissement, les bords des deux catégories de clichés.

- Report de la position du repère du cliché 35 mm au cliché RC10 par superposition stéréoscopique sous des grossissements différents, les deux vues n'étant pas à la même échelle, avec marquage du point au PUG.

- Enfin, lors de la mesure sur stéréocomparateur, on décalait la position du point marqué d'une longueur correspondant, à l'échelle du cliché mesuré (24 x 24 cm) soit 1/30.000è, au déplacement de l'avion pendant 72 ms (entre 11 et 12 métres).

L'ensemble de ces opérations ne permettait pas d'obtenir toute la précision désirable. Il semblerait que la première chose à rechercher soit de pouvoir se passer de la vignette prise par la chambre 35 mm, le tir laser devant être colinéaire ou parallèle à l'axe de la chambre métrique RC 10. Les deux événements: ouverture du diaphragme de la chambre RC 10 et le tir laser n'étant séparés que de 4 ms ce qui correspondait, pratiquement, au temps d'obturation utilisé.

La nécessité de passer par l'intermédiaire de la vignette entraînait une indétermination sur la position de l'impact au sol de 1 m pour l'erreur commise sur ce retard, qu'il fallait composer avec les erreurs de marquage et de report soit , globalement, un écart-type de 2,50 m à l'échelle considérée en terrain couvert, ou irrégulier, ou en pente, c'était beaucoup trop, et probablement rédhibitoire.

De surcroit, on avait dû faire une première exploitation du bloc pour vérifier, dans chaque bande, la vitesse de l'avion par rapport au sol (ordre de grandeur 150 à 160 m/sec.) ce qui, en exploitation normale, ne serait pas possible: la vitesse mesurée à bord étant toujours la vitesse par rapport à l'air. On doit noter, pour être complet, que le récepteur TR5-S B de la SERCEL donnerait la vitesse de l'avion avec une précision très suffisante. Dans les essais présentés il n'avait pas été associé aux mesures laser.

8.5.2.LE MARQUAGE DES POINTS.

De façon tout à fait générale, le marquage double des points semble être une opération peu précise. On reste toutefois assez confondu face aux résultats, qui sont toujours meilleurs que ce qu'on pourrait espérer. Ceci est à porter au crédit des opérateurs de l'IGN dont la sélection et l'entraînement sont tout à fait remarquables.

En particulier, on a pu vérifier sur des points laser vus sur trois clichés successifs que l'erreur d'identification du point photogrammétrique, en altimétrie, n'était de l'ordre que de 0,15 à 0,20 m.

Hélas, le résultat final est loin de cette fourchette, mais il ne semble pas que le marquage, lui-même, puisse être incriminé.

8.5.3.NOTATION DES POINTS D'IMPACT COMME REFLECTEURS LASER.

Pendant les mesures au stéréocomparateur, on a demandé aux opérateurs de noter la qualité du point d'impact laser. En effet la littérature, relativement complète sur le sujet, met en garde, surtout dans les zones couvertes de végétation, sur l'indécision propre à des réflections provenant des différents niveaux d'un végétal. En outre, l'indécision sur la position précise du point d'impact fait redouter les terrains en pente. La qualité du point d'impact a été notée de 1 à 5; des commentaires sur le point photographique ont été ajoutés spontanémment, enfin, les opératrices/opérateurs ont noté les pointés effectués au-dessus du sol (mire), ces informations ont été précieuses pour la recherche des fautes. [23 KRABILL & COLLINS, 25 MOREAU].

8.5.4. ESSAI D'UNE PROCEDURE D'ELIMINATION DES FAUTES DE MESURES LASER.

Les essais d'élimination a posteriori effectués n'avaient pas été couronnés de succès car les résidus d'ajustement, qui étaient la conséquence d'une faute sur un sommet, apparaissaient sur des sommets voisins en sorte que, soit on éliminait une bonne mesure, soit on conservait une faute.

On avait retrouvé ce résultat par des simulations faites sur des blocs créé artificiellement; on avait recherché une explication géométrique simple; d'après le schéma de la figure 11 on remarquera qu'une faute sur une mesure de longueur, entre un point au sol et un sommet se traduit, toutes choses restant égales par ailleurs, par un déplacement alternatif des

points au sol et des sommets, si bien que l'effet direct sur le sommet auquel est attachée la mesure est accompagné d'effets inverses sur ses deux voisins immédiats. Or les fautes du laser sont rarement solitaires, on a déjà cité un auteur qui avait fait la même remarque, elles se produisent par groupes de deux ou trois mesures successives, en sorte que les résidus élevés qui apparaissaient à un sommet pouvaient provenir de fautes faites sur des mesures attachées à d'autres sommets.

Par ce moyen, les chances paraissaient égales entre éliminer une faute ou une bonne mesure ou, encore, de conserver une faute, ce qui n'était vraiment pas encourageant !

Jusqu'ici tous les moyens utilisés sauf celui indiqué ci-après, se sont soldés par des échecs, essentiellement pour deux raisons répétées ci-après :

1. Deux mesures de hauteur laser successives sont corrélées négativement, une faute sur un sommet engendre des fautes de signe inverse sur ses deux voisins.
2. Des fautes se sont produites dans ces vols, sur plusieurs sommets successifs, rappelons que cela avait été, déjà, signalé par un auteur [25 MOREAU] .

Dans ces conditions l'interprétation des résidus d'ajustement était tout à fait problématique.

PROPOSITION

Toutefois, si le bloc n'est pas trop grand, on peut appliquer les "recettes" suivantes :

1. D'abord raidir le bloc photogrammétrique en fixant son écart-type à 5 µm. Le calculer sans faire intervenir de mesures aéroportées. Calculer les distances entre les sommets perspectifs calculés et les points laser calculés.

2. Se fixer un écart-type <u>faible</u> pour les mesures laser, disons un mètre. Comparer les hauteurs laser calculées aux hauteurs laser mesurées, après détermination de la "constante" du chantier.

3. Eliminer toutes les mesures laser dont les différences seraient supérieures à 3 mètres. Eventuellement reprendre les opérations précédentes.

4. moins contraindre le bloc photogrammétrique sur les appuis en fixant l'écart-type de ses mesures à sa valeur composée avec son biais moyen quadratique ($\sigma_o^2 + b^2$) et le calculer avec les mesures aéroportées qui n'ont pas été éliminées.

Cette proposition tient compte du fait que même si le bloc est <u>déformé</u> par des <u>systématismes</u> les <u>hauteurs ne sont pas ou sont peu affectées</u>.

Cette procédure a été efficace sur un bloc de soixante (60) photographies au 1/30.000ème correspondant à celui sur lequel elle a été essayée, on ne sait pas si elle le serait sur de plus grands blocs, mais dans le principe, rien ne s'y oppose-

rait.

Elle a par contre le défaut d'allonger les calculs de façon très significative, puisqu'il faut calculer le bloc une fois au moins pour calculer les hauteurs laser et les comparer aux hauteurs mesurées.

8.6. LES CALCULS D'AEROTRIANGULATION APPUYES NORMALEMENT AU SOL ET SERVANT D'ELEMENTS DE COMPARAISON.

Les résultats détaillés et les commentaires sont donnés en ANNEXE V , ils sont résumés ci-après:

Ecarts-types sur les points de contrôle			
CHANTIERS	X	Y	Z
Magnac-Laval-La Souterraine	-	-	0,76
Argenton-Bourganeuf	-	-	0,57
La Souterraine	0,69	0,69	0,46

Les tirets(-) indiquent qu'il n'y avait pas de coordonnées planimétriques aux points de vérification dans ces blocs.

8.7. LES RESULTATS

Les mesures laser seules, des deux premiers chantiers n'ont pas pu être introduites dans la compensation, puisqu'il était devenu évident, par les simulations, que cela aurait été inopérant.

On n'a pu que comparer les hauteurs mesurées à l'aide du télémètre laser, aux hauteurs calculées correspondantes du bloc photogrammétrique placé sur ses appuis.

8.7.1.VOL MAGNAC-LAVAL LA SOUTERRAINE.

Il s'agissait de mesures de hauteur laser, seules.

Les opérateurs avaient donné, aux points d'impact du flash laser, des notes comprises entre 0 et 5, les résultats étaient les suivants:

Note	Nombre de mesures	Systématisme	Ecart type
5	27	0,18m	0,55m
3 et 4	14	- 0,05m	0,99m
2	12	0,19m	1,45m
1	20	- 0,78m	2,60m
0	19 . mesures éliminées a posteriori		
Total	92	-0,13m	1,34m

.....La note zéro (0) a été donnée à des points aberrants éliminés après calcul; c'est-à-dire que rien, au moment de leur observation, ne permettait de supposer qu'ils seraient inacceptables, sauf que beaucoup d'entre eux avaient été pointés au sommet de la végétation ,ils étaient notés: mire, et que, de toute évidence, la réflexion laser s'était faite à un niveau inférieur et, en tous cas , différent.

Les autres étaient notés: bois , car le sol avait pu être pointé entre les arbres, mais la réflexion s'était faite plus haut, dans le feuillage ou dans les branches.

L'objectif était, évidemment, de pondérer différemment les points en fonction de la qualité du point d'impact du flash laser.

La belle ordonnance de ce tableau, qui pouvait laisser espérer une solution élégante, ne s'est pas retrouvée dans les expériences ultérieures et cette idée a été abandonnée. On a conservé le système de notation, qui avait le mérite d'éviter au calculateur d'avoir à faire "réobserver" le point d'impact en cas de difficultés, d'autant que spontanément les opérateurs avaient tendance à justifier leurs notes par des commentaires forts précieux pour l'analyse ultérieure des résultats.

8.7.2.VOL D'ARGENTON BOURGANEUF.

Comme précédemment, les points étaient notés pour exprimer leur qualité, comme réflecteurs de l'onde laser, par l'opérateur qui les avait observés sur les photographies aériennes; en outre, on avait éliminé des mesures "a priori" aberrantes et des points qui, de toute évidence, risquaient de poser des problèmes, à savoir les parties boisées denses, les zones bâties, les terrains en pente forte.

A l'expérience il n'a pas été possible d'éliminer toutes les fautes "a priori"; en effet, sur des points jugés excellents par l'opérateur on a relevé des réflections au-dessus du sol qui restent, encore, sans explication.

On n'a exploité, finalement, que les mesures notées 5.

On en a compté 77 sur 194 impacts, on a dû éliminer 6 d'entre elles "a posteriori", pour en conserver 71 .

On a noté :

- un systématisme de 1,29m - un écart-type de 0,75m

Par contre si on n'élimine que deux des mesures notées 5 a priori parmi celles qui paraissent les plus erronées on aurait:

-Un systématisme de 1,06m,
-Un écart-type de 1,24m

Puis si on ne tient aucun compte des notes données a priori et si on explore la zone dans laquelle il n'est pas possible de départager les vraies fautes des erreurs accidentelles un peu trop fortes pour une fontion de répartition normale on aurait:

Pour 138 mesures sur 194:

-Un sytématisme de 1,32m,
-Un écart-type de 0,88m

Ce qui montre qu'à l'inverse du précédent, sur ce chantier, les notations n'apportent que peu d'informations utilisables.

Pour 145 mesures sur 194:

-Un systématisme de 1,24m
-Un écart-type de 1,01m

Pour 151 mesures sur 194:

-Un systématisme de 1,08m ,
-Un écart-type de 1,25m.

Au-delà on est à peu près certain que les écarts qu'on peu constater ne sont plus dûs qu'à des **fautes**, mais si 32 de ces fautes, qui étaient notées de 1 à 3, peuvent apparaîtrent comme explicables, car l'éclair laser avait touché un point mal défini qui était noté:

Bois (mire ou sol ?),
Maison (dessus ou à coté ?),
Eau (une seule fois),
Terrain en pente (où ?)
Route (dessus ou à coté ?),
Ravin (au fond ou sur les bords ?) ,

Il est par contre encore inexplicable que 11 points notés de 3 à 5 avec la désignation :

Champs,

soient faux car il n'existait dans leur voisinage aucun point sur lequel une reflexion parasite aurait pu se faire.

Mais, à l'inverse, certains points ne presentaient pas des écarts après ajustement quiauraient justifié les mauvaises notations données a priori par les opérateurs.

On n'a trouvé aucune explication à la valeur du systématisme

différente de celle du chantier précédent. En outre, 40 points sur 194 au total auraient dû être éliminés a posteriori comme correspondant à des réflexions de l'éclair laser à des niveaux différents des pointés stéréoscopiques.

Dans ces conditions, il devenait presque certain que la précision de la chaîne de mesure laser était insuffisante, à elle seule, pour appuyer des blocs photographiés au 1/30.000ème. On a vu, aussi, qu'il y avait des raisons plus graves pour lesquelles les mesures laser ne pouvaient pas être utilisées, seules, pour appuyer les blocs d'aérotriangulation. M.HOTTIER considère qu'"a priori" c'était évident en raison, notamment, du manque de relief du terrain.

8.7.3. MESURES LASER SEULES A LA SOUTERRAINE

1ère bande

Deux sommets avaient été éliminés par l'opérateur, donc a priori, deux sommets aberrants avaient été éliminés "a posteriori".

Ecart quadratique moyen	: 1,80 m
Biais	:+3,75 m

2ème bande

Deux sommets avaient été éliminés par l'opérateur.
Sur deux sommets le laser n'avait pas fonctionné. Deux sommets avaient été éliminés "a posteriori", il ne restait donc que neuf sommets à partir desquels les mesures étaient utilisables.

Ecart quadratique moyen	: 2,29 m
Biais	:+3,73 m

3ème bande

1ère partie (reprise). Cette demi-bande ne comportait que sept sommets, dont un avait été éliminé a posteriori pour les mêmes raisons que précédemment.

Ecart quadratique moyen	: 1,57 m
Biais	:+3,61 m

3ème bande

2ème partie (prise de vue initiale). Cette demi bande ne comportait que huit sommets, dont trois ont été éliminés par l'opérateur.

Ecart quadratique moyen	: 1,49 m
Biais	:+3,82 m

4ème bande

Huit (8) sommets avaient été éliminés par suite de mauvaises notations de l'opérateur.
Un sommet (1) avait été éliminé a posteriori.
Un tir laser était, d'évidence, incorrect (Hauteur < 300 m).
Il ne restait donc que cinq sommets auxquels étaient rattachées des mesures laser utilisables.

Ecart quadratique moyen	: 1,05 m
Biais	:+4,54 m

Bilan global

1ère bande	11 sommets
2ème bande	9 sommets
3ème bande	11 sommets
4ème bande	5 sommets
	36 sommets/60

60 % des mesures étaient donc utilisables avec :
Ecart quadratique moyen : 1,80m
Biais :+3,80 m

Il est important de bien souligner que le biais, figurant dans les tableaux, était calculé après que les corrections de réfraction et de différence de niveau entre l'appareil de mesure et la chambre de prise de vues aient été préalablement faites. Il s'agissait donc d'un biais qu'on ne savait pas expliquer. Il était évidemment fâcheux que ce biais varie de façon inexplicable d'un chantier à l'autre. Ce biais était particulièrement gênant lorsqu'on envisageait de se servir des mesures laser pour transmettre l'échelle. Rappelons que MM.-HOTTIER et EGELS attribuent ce biais à la présence de systématismes mal corrigés sur les mesures faites sur les clichés.

8.8. CONCLUSIONS

Les résultats peuvent être résumés comme suit:

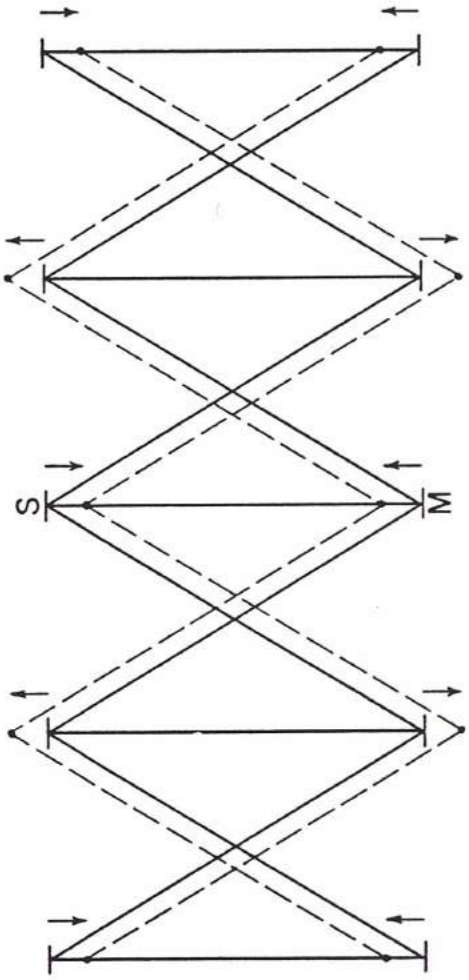
CHANTIERS	Ecart my-q sur la mesure de hauteur
Argenton-Bourganeuf	1,08m
Magnac-Laval-la Souterr.	1,34m
La Souterraine	1,80m

Compte tenu de l'indécision qui existe sur l'altitude des sommets perspectifs, qu'on peut estimer à 0,70m-0,80m, peut-être un mètre, et les systématismes qui peuvent subsister malgré les corrections apportées par les inconnues de systématisme de DULOUX, ces résultats sont probablement assez voisins de ceux publiés à l'étranger, où les canevas photogrammétriques de comparaison étaient à bien plus grande échelle, donc plus précis.

Il faut, par contre, remarquer que les auteurs étrangers ne se sont pas étendus sur le nombre des "fautes".

Pour les suites à donner à ces essais on se reportera aux conclusions qui seront tirées des essais combinés du laser et du capteur de pression dans un chapitre suivant.

Figure 11



9.
UTILISATION DES CAPTEURS DE PRESSION POUR APPUYER LES BLOCS D'AEROTRIANGULATION

9.1. GENERALITES

On rappelera, tout d'abord qu'un capteur de pression est un baromètre qui donne la pression absolue qui règne à la prise d'air réservée à cet effet à l'extérieur de l'avion. Les statoscopes, qui étaient, à l'origine destinés à indiquer au pilote s'il maintenait son vol à une altitude constante mesuraient la différence de pression entre la prise d'air extérieur et une enceinte à pression constante thermostatée.

Dans l'usage qui est fait des capteurs de pression, dans l'impossibilité où on se trouve de transformer la pression mesurée directement en altitude, il n'existera aucune différence dans l'emploi des mesures des deux types d'appareils.

9.2. LES CHANTIERS

Les chantiers où les capteurs de pression ont été utilisés seuls ou associées à d'autres appareils de mesures sont les suivants

LA SOUTERRAINE en association avec des mesures de hauteurs laser qui, dans ce chapitre seront laissées de coté.

LUNEL et

VICHY en association avec un système de positionnement global(G.P.S) dont les mesures ne seront pas utilisées non plus.

LA GUYANE qui était le premier chantier de production utilisant un capteur de pression pour pallier le manque de points d'appui au sol.

On pourrait aussi citer ALBERTVILLE et MANOSQUE qui sont des chantiers où les capteurs de pression aidaient une constellation G.P.S dégradée.

9.3. LES MATERIELS

STATOSCOPES ET CAPTEURS DE PRESSION.

Les appareils de mesures ne seront évoqués, ici, que très sommairement: ils comportaient tous une capsule manométrique, raccordée aux prises de pression extérieure et plongée dans une enceinte à la pression de référence; dans l'ancien statoscope WILD, décrit dans [3 BROSSIER], cette enceinte était thermostatée par des résistances chauffantes, dans le statoscope

ZEISS par de l'eau glacée, dans les capteurs de pression CROUZET, l'enceinte était sous vide.

Selon le constructeur, le capteur de pression type 44 est asservi à un équilibre de forces. La force développée par la pression à mesurer déforme le soufflet de la capsule, qui déplace un fléau; ce déplacement est capté, et déclenche l'intervention d'une force de rappel électromagnétique, créée par une tension électrique qui fait l'objet de la mesure: le courant dans la bobine de rappel traverse une résistance aux bornes de laquelle apparaît une tension proportionnelle à la pression, c'est la mesure; le circuit électronique d'asservissement maintient, en permanence, cet équilibre. La capsule elle-même n'est pas déformée, puisque c'est sa déformation qui est corrigée par la force de rappel, le fabricant prétend limiter la déformation résiduelle à 0,2µm.

Le manomètre numérique à quartz, type 2100, à visualisation LCD, exploite les informations de un ou deux capteurs de pression à quartz type 51, la mesure de la déformation du soufflet de la capsule ne se fait plus par un rappel électromagnétique, mais en butant le fléau de mesure sur un monocristal de quartz, dont la fréquence de résonance est fonction de la contrainte appliquée. On utilise l'effet piézo-électrique du quartz pour le mettre en vibration et mesurer sa fréquence de résonance. Une sonde résistive, placée à l'intérieur du capteur, associée à un oscillateur, mesure la température interne du capteur: il serait souhaitable que le fabricant puisse afficher la température de l'air dont on mesure la pression, ou qu'il donne directement le gradient dp/dZ ou dM/dZ qui pourrait être calculé par le microprocesseur qui est incorporé à l'appareil.

A partir de ces deux informations, pression et température, on accède à la pression exacte par un modèle polynomial, dont les coefficients caractéristiques sont stockés dans la mémoire interne du capteur.

Ces mesures peuvent être faites à une cadence très élevée: quatre mesures toutes les 1,6 seconde soit en tenant compte de la vitesse du MY 20 tous les 64 à 80 métres.

9.4. MODELES DES MESURES DES CAPTEURS DE PRESSION

9.4.1. Les difficultes rencontrées dans la recherche des modèles stochastiques et fonctionnels des mesures des capteurs de pression (Voir Annexe I)

Dans la grande majorité des programmes de calcul, sinon dans tous, la pondération des observations se fait de façon tout à fait élémentaire en introduisant une matrice de variance diagonale dont tous les termes sont égaux; c'est aussi le cas du programme FAISCEAUX de l'I.G.N.:

$$\sigma^2.I \quad \text{soit} \quad \begin{matrix} \sigma^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma^2 \end{matrix}$$

.....

C'est, évidement, admettre que les observations ne sont pas corrèlées entre elles, ce qui est très souvent contestable, surtout lorsque les "données" entrées comme des observations sont des résultats de calculs menés indépendamment, dans ce dernier cas il faudrait, bien sûr, entrer la matrice des variances et des covariances, ce qu'on ne fait qu'assez rarement.

C'est le cas, notamment, des points d'appui et des coordonnées des sommet déterminées à l'aide d'un récepteur G.P.S., on ne sera donc jamais certain de ne pas introduire des relations où la configuration géomètrique entre les observables nominaux créé pas des liaisons involontaires et inconnues.

Le problème a été correctement posé, et traité, pour les observations G.P.S en Géodésie :

[27 Vidal ASHKENASI,Joan VAU]

mais, de façon assez étonnante, totalement perdu de vue dans l'utilisation du Statoscope en Aerotriangulation : [28 .A.R.BLAIS & CHAPMANN].

La recherche d'un modèle fonctionnel compatible avec le modèle stochastique imposé par les programmes en usage, ou par les habitudes, doit être l'objectif primordial.

On trouvera en ANNEXE I l'exposé sur lequel on s'est appuyé pour ce qui suit:

9.4.2. APPLICATION DE PRINCIPES etablis pour G.P.S AUX MESURES DES CAPTEURS DE PRESSION

Les mesures d'altitudes faites à l'aide du statoscope sont rapportées à une surface isobare inconnue; le vol de l'avion photographe se fait à une altitude qui varie le moins possible, il est tout à fait normal que l'altitude de vol ne varie pas plus que de plus ou moins 25m; dans ces conditions, parmi les modèles les plus simples, on peut choisir la relation linéaire:

$$M = A.Z - B$$

Z étant l'altitude de l'appareil en mètres

M la mesure **calculée**, généralement exprimée en volts ou en hectopascals, on verra, dans le corps de l'exposé, que les unités de mesure utilisées sont de peu d'importance dans la procédure de compensation par les moindres carrés.

A et B des coefficients inconnus à déterminer dans le calcul.

Cette formule linéaire n'est évidement valable que parce que l'altitude de vol varie peu, et parce que le temps de mesure n'est jamais trop long, et que le temps qu'il fait n'est pas trop perturbé. En pratique, ces hypothèses restrictives ne sont pas du tout gênantes, l'observation d'une bande de vol ne prend que de cinq à dix minutes, et le temps doit être beau pour qu'on puisse prendre les photographies correctement.

A l'expérience il devient vite évident que les vols sont tous faits dans des conditions anticycloniques carac-

tèristiques des périodes de beau temps et que, par conséquent, toute utilisation de modèles standards, c'est-à-dire moyens, que ce soit pour les calculs de la réfraction, ou de modèles d'atmosphère pour en tirer des relations Pression-altitude, est vouée à l'échec le plus complet.

En outre la formule linéaire proposée ne vaut que si la surface isobare est horizontale, dans le cas contraire on serait obligé d'introduire des termes modèlisant cette surface: c'est ce qu'on fait en A.P.R. On peut, aussi, introduire de nouveaux termes tenant compte d'une dérive temporelle de la pression, on peut introduire n'importe quelle hypothèse, pourvu que les résultats veuillent bien la confirmer, mais on "affaiblit" la mesure.

Un modèle de ce type a été proposé par [29 DUANE .C. BROWN]:

$$M = B - A.Z + C.t + D.t^2 + \ldots\ldots\ldots$$

avec les mêmes notations C et D étant des coëfficients inconnus à déterminer au cours de l'ajustement; t étant le temps de la mesure à partir d'une origine arbitraire.

Si les mesures sont faites à des intervalles réguliers, comme c'est le cas au cours d'une bande de vol, cette relation pourrait être remplacée par une autre où, à la variable temps, on substituerait le numéro du cliché:

$M = B - A.Z + c.n + d.n^2 + \ldots\ldots\ldots$ n étant alors le numéro du cliché.

Sans prendre position dès maintenant sur l'opportunité d'utiliser des modèles aussi compliqués, on pourra remarquer que, dans le modèle simplifié, il est possible d'éliminer l'inconnue B en prenant comme observable, c'est-à-dire comme mesure, non plus M mais $M_{n+1} - M_n$; soit S ce nouvel observable.

$$DM = - a.S$$

Seulement, pour enchaîner les mesures, on devrait faire, pour autant qu'on soit certain que le premier modèle est celui qui est le plus proche de la réalité physique:

$$\begin{array}{l} DM_1 = -a.(Z_2 - Z_1) \\ \ldots = \ldots\ldots\ldots\ldots \text{ou} \\ DM_n = -a.(Z_{n+1} - Z_n) \end{array} \quad \ldots \quad DM_i = a \begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} . \begin{vmatrix} \ldots\ldots\ldots \\ Z_{i+1} - Z_i \\ \ldots\ldots\ldots \end{vmatrix}$$

Si **A** est une matrice on peut écrire:

$\mathbf{Dm} = \mathbf{A}.\mathbf{Dz}$ **Dz** et **Dm** étant des vecteurs on aura:

$$\mathbf{A}^T.\mathbf{A} = \begin{vmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \ldots\ldots \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \ldots\ldots \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \ldots\ldots \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \quad 0 \ldots \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \quad -1 \quad 0. \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \end{vmatrix}$$

L'inverse de cette matrice a été calculé analytiquement et le résultat est le suivant:
[30 E.DURAND 1961].

$$(A^T.A)^{-1} = \frac{1}{(n+1)} \begin{vmatrix} n & n-1 & n-2 & n-3 & n-4 \ldots\ldots & 1 \\ n-1 & 2(n-1) & 2(n-2) & 2(n-3) & 2(n-4) \ldots\ldots & 2 \\ n-2 & 2(n-2) & 2(n-2) & 3(n-3) & 2(n-4) \ldots\ldots & 3 \\ n-3 & 2(n-3) & 2(n-3) & 4(n-3) & 4(n-4) \ldots\ldots & 4 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & n \end{vmatrix}$$

Cette matrice est doublement symétrique, à la fois par rapport à sa diagonale principale, et par rapport à sa diagonale secondaire.

Par ailleurs les termes de la diagonale principale peuvent être représentés par une relation:

$a.Rg^2+b.Rg+c$,Rg étant le rang de ce terme.

Ou même:

a. Rg .(Rg -N) +c , N étant le nombre de sommets.

La première et, par conséquent, la derniere ligne et la première et la dernière colonne sont en progression arithmétique; on voit immédiatement que si le programme de calcul qu'on va utiliser, pour entrer les observables $M_{n+1}-M_n$ n'est pas en mesure de prendre en compte la matrice de poids calculée, on se référera, sans le savoir, à un modèle stochastique différent de celui qu'on croyait utiliser, et ce modèle pourra etre moins fidèle.

Si, comme l'ont préconisé certains auteurs, on veut poursuivre vers des différences secondes [28], voire troisièmes, on arrivera à des résultats encore plus éloignés du modèle initial .

Si on traitait, de cette façon, la relation complète , jusqu'aux différences troisièmes, on aurait, par exemple:

$$A = \begin{vmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & -1 & 3 & -3 & 1 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & -1 & 3 & -3 & 1 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 3 & -3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 3 & -3 & 1 \ldots\ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \end{vmatrix}$$ puis

$$(A^T.A)_{6x6} = \begin{vmatrix} 20 & 15 & 6 & -1 & 0 & 0 \\ 15 & 20 & 15 & 6 & -1 & 0 \\ 6 & 15 & 20 & 15 & 6 & -1 \\ -1 & 6 & 15 & 20 & 15 & 6 \\ 0 & -1 & 6 & 15 & 20 & 15 \\ 0 & 0 & -1 & 6 & 15 & 20 \end{vmatrix}$$ dont l'inverse est

0,10	0,26	-0,18	-0,13	0,32	0,21
	0,35	0,07	0,41	-0,59	0,32
		0,34	-0,56	0,41	-0,12
			0,34	0,07	-0,18
				.....	
					0,10

avec, à nouveau, la double symètrie; cette manière de procéder fait que les auteurs ont publié des résultats totalement discordants:

Selon [31 W.FAIG déjà cité] l'écart-type, sur une mesure statoscope serait de 1,04m; dans la même publication sur une bande de 56 couples avec 28 points d'appui, l'écart-type sur les points de contrôle serait de 2,40m si on utilise les mesures du statoscope, pour 5,68m sans ces mesures.

Dans une publication, beaucoup plus récente [28 BLAIS & CHAPMANN], on cite sur des bandes de 23 et 27 couples bénéficiant de 13 points d'appui un écart-type de 6,58m sans statoscope, puis avec des mesures statoscope, utilisées en simples différences: 5,19m et 5,62m en doubles différences! Alors que l'apport direct des mesures statoscopes serait beaucoup plus important, car ce sont les différences qui dégradent fortement les résultats.

Appliquées aux mesures de la première citation le calcul par différences porterait l'écart-type de 1,04m à 3,23m.

La plupart des auteurs en concluent, tout naturellement, que l'introduction de termes non linéaires est probablement illusoire, ou bien que ces termes sont physiquement absents du modèle fonctionnel, alors que c'est seulement le modèle stochastique qui est faussé par les différences. Ils oublient, par conséquent, d'envisager que ce soit le modèle stochastique qui est, en quelque sorte, implicite dans le programme de compensation, qui puisse être la cause des mauvais résultats obtenus.

On voit que si on prend les différences de mesures et qu'on les traite comme des observables en donnant un écart-type à la "nouvelle mesure" on créera artificiellement une croissance parabolique de la variance de la mesure de l'altitude, qui est la "vraie mesure" avec un maximum au milieu de la bande, donc un minimum de poids, là où l'effet des mesures statoscope serait le plus favorable; sur une bande de 16 clichés, et une variance unité à chaque sommet, donc on donnerait, de façon érronnée, une variance unité à chaque différence, on aurait les résultats suivants:

Variances:

0	0,93	1,73	2,40	2,93	3,33	3,60	3,73	3,73	3,60	3,33	2,93	2,40

Sommets:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Sommets: X Symétrique

16	15	14

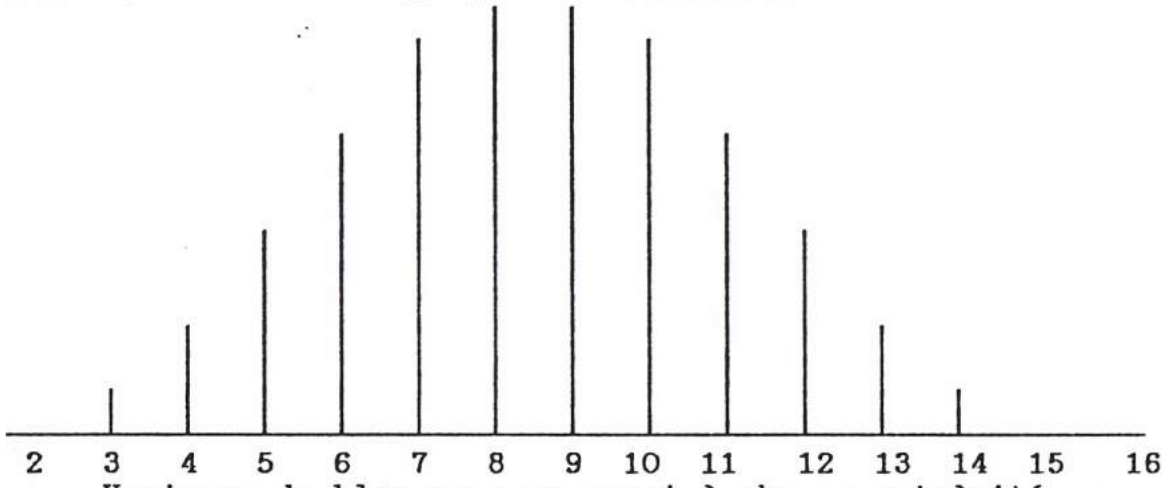
C'est ce phénomène que la matrice des poids tente de corriger.

La bande serait donc mal tenue en son axe de symètrie marqué d'un X là où, justement, elle est la plus déformée, et là où un appui serait le plus efficace, ce qui est, à tout le moins, fâcheux.

On arrive à la conclusion que les mesures statoscope doivent être d'autant plus efficaces qu'elles sont moins corrélées entre elles; c'est cette importante propriété du modèle stochastique qu'ont confirmé les essais.

On s'est livré à des simulations sur une bande unique en vérifiant que les résultats sont tout à fait comparables sur un bloc:

Soit une bande de 16 clichés appuyée à ses deux extrèmités. En estimant une erreur en convergence égale à chaque sommet, on aurait le graphe des variances suivant:

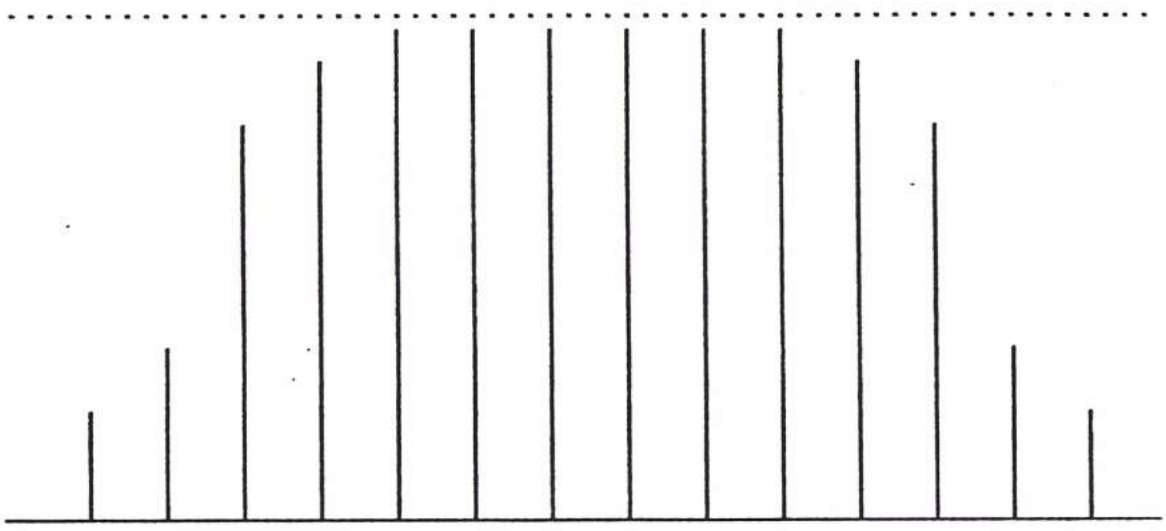


Variance du bloc avec un appui à chaque extrèmité,

en 1 et en 16 la variance est nulle, en 2 et 15 la variance est négligeable; dans l'axe l'écart-type est de 8,00m, cette hypothèse est tout à fait conforme à ce que l'on rencontre dans la réalité.

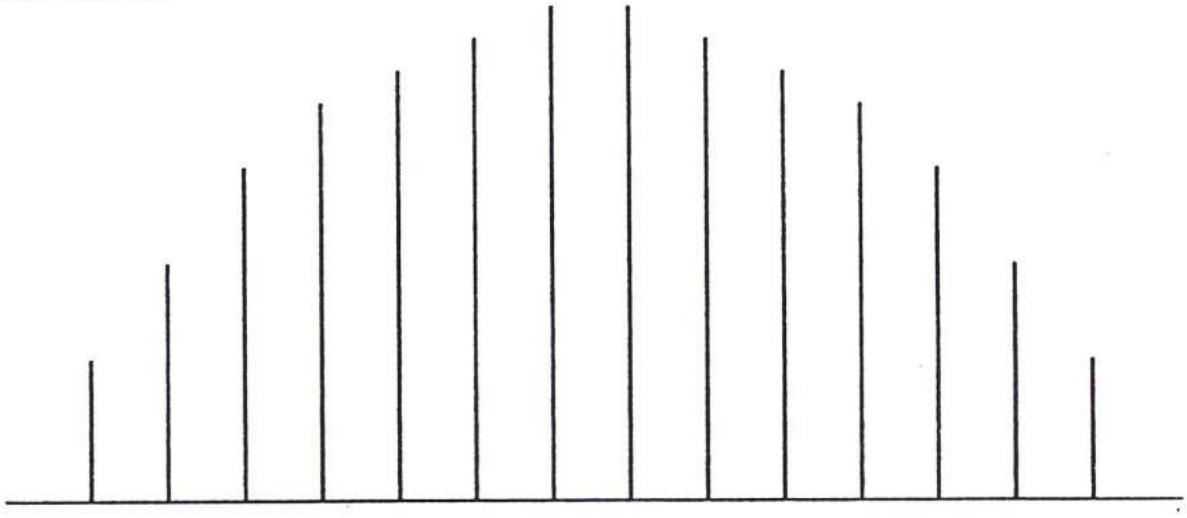
Si on fait ensuite l'hypothèse tout à fait raisonnable suivante:

1°/On ajoute les mesures d'un statoscope d'écart-type uniforme de 2,00m sur les altitudes, représenté par une ligne de points sur le graphe ci-dessous..... tout au long de la bande, et qu'on ajuste les deux catégories de mesures, on obtient le résultat suivant représenté par un graphe des variances (et non des écarts-types).



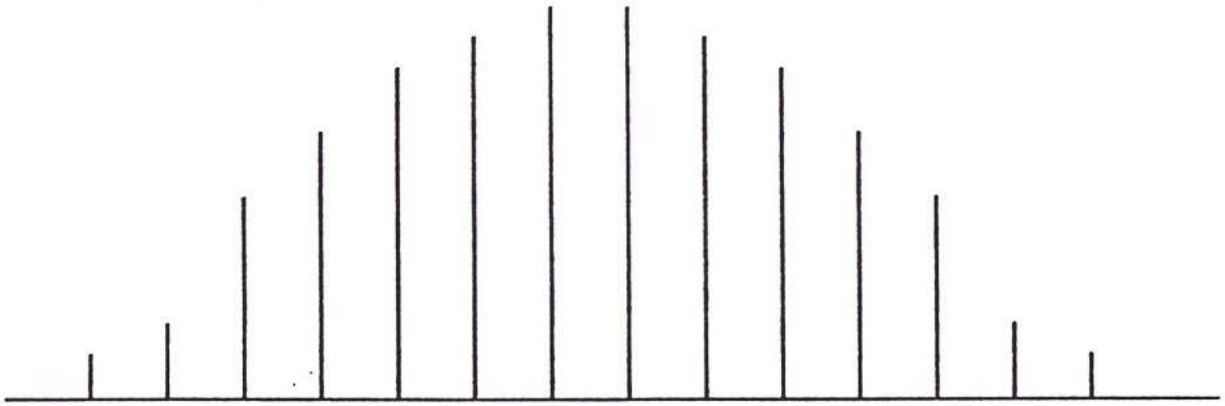
Ecart-type de 1,58 m après ajustement avec des mesures statoscope d'écart-type uniforme de 2,00m ;avec un maximum de 1,94m dans l'axe, le graphe représente, aussi, les variances.

2°/ Par contre:
Si la variance du statoscope est de 2,00m sur les différences des mesures :
La variance sur l'altitude donnée par le statoscope sera la suivante:



Variance du statoscope avec un maximum de 3,55m dans l'axe.

En ajustant les mesures du bloc et celles des différences des mesures du statoscope on obtiendra le résultats représentés par le graphe des variances suivant:



Variance de l'ajustement entre le réseau et le statoscope avec un modèle stochastique comme sur la figure précédente; l'écart type de l'ajustement est de 2,51m avec un maximum, dans l'axe de 3,48m.

Le rapport entre les écarts-types résultant des deux hypothèses est de 1,59.

Ce ne sont que les essais qui pouvaient trancher entre les différents modèles fonctionnels et stochastiques en examinant les résultats sur les points de contrôle; ces essais avaient confirmé que le meilleur modèle était:

M = A.Z - B + termes correctifs éventuels, sans faire les différences entre les mesures des sommets;

par ailleurs la détermination de l'"inconnue" A était très difficile et très imprécise sur les bandes où les différences de niveau entre les sommets étaient les plus faibles, c'est-à-dire lorsque le vol était parfait! On a donc été amené à entrer le paramètre A comme une donnée résultant d'un calcul, extérieur à la compensation, fait à partir de la température de l'air dont on mesure la pression et de constantes physiques connues. Il sera probablement plus simple, dans l'avenir,de demander au fabricant de l'appareil de mesure de fournir, soit la température de l'air mesurée dans l'instrument, soit le paramètre A directement calculé par le microprocesseur de l'appareil qui calcule déjà, à l'aide d'un modèle polynomial, les corrections de température à faire aux mesures.

9.5. MODELES DES MESURES STATOSCOPES ESSAYES.

Les mesures statoscopes avaient fait l'objet de publications précises concernant les modèles proposés ou utilisés [29 BROWN, 32 VERIE, 31 FAIG].

Pour l'essentiel elles passaient sous silence le fait que les mesures directes n'étaient pas des altitudes, mais plus généralement des tensions électriques, obtenues à la sortie d'appareils les plus variés: on peut mesurer soit la déformation d'une membrane à l'aide d'une jauge de déformation (strain gauge) ou le courant nécessaire pour équilibrer un fléau rétablissant un équilibre, soit une mesure piézoélectrique de la fréquence de résonance d'une barre de quartz comprimée par le fléau lié à la

membrane; tout dépend du principe physique utilisé dans l'appareil.

Pour nous, l'essentiel était que la mesure, quelle qu'elle soit, reste strictement proportionnelle à la pression à mesurer, qu'importe son expression, ceci était largement prouvé par les essais d'étalonnage du constructeur: CROUZET.

Il convenait en outre de rappeler que la trajectoire de l'avion photographe est sensiblement horizontale; à l'origine le statoscope ne servait, à rien d'autre, qu'à aider le pilote à le maintenir à la même altitude, il n'était donc pas nécessaire de rechercher d'expression compliquée reliant l'altitude à la pression, à la tension, disons plutôt, à la mesure.

Dans une zone où la variation d'altitude était faible il était possible de se contenter d'une expression linéaire.

On a essayé plusieurs modèles :

9.5.1. TRANSFORMATION PREALABLE DES TENSIONS EN ALTITUDES.

On avait, d'abord, essayé ce système à la Souterraine, les résultats avaient été excellents. On transformait d'abord, dans un calcul indépendant de la compensation, les tensions en altitudes A, puis on écrivait :

$$Z = A + Bb$$

Z est l'altitude vraie, A est la "mesure ainsi transformée"et Bb une constante inconnue par bande.

La transformation des tensions électriques M en altitudes A, se faisait à l'aide d'un modèle tiré d'un vol précédent ou d'un modèle d'atmosphère généralement "standard", faute de mieux.

9.5.2. MODELE A DEUX INCONNUES.

On avait, ensuite, adopté une relation linéaire, valable localement, entre la pression et l'altitude sous une forme utilisable directement dans la compensation :

Pression calculée = constante + paramètre * altitude calculée

Le coefficient de corrélation trouvé, à la Souterraine, était de 0,93 ce qui était bon, mais sans plus, en raison, probablement, de la mauvaise détermination du paramètre.

Cette formule pouvait être généralisée en :

mesure calculée= constante inconnue + paramètre inconnu x altitude calculée.

Ce modèle n'a pas donné de bons résultats car le "paramètre inconnu" pouvait être très mal déterminé, notamment lorsque le vol était correct, c'est-à-dire parfaitement horizon-

tal, il devenait, alors, totalement indéterminé, et provoquait des instabilités dans la résolution des équations normales.

On a dû se résoudre à écrire une équation de stabilisation évitant des variations trop importantes de cette inconnue, seulement, cette équation de stabilisation ne donnait pas de résultats bien probants, sauf lorsqu'elle bloquait toute évolution de l'inconnue en la maintenant à la valeur qui lui avait été donnée lors de l'initialisation, d'où le choix du modèle suivant:

9.5.3. MODELE A UNE INCONNUE .

En reprenant le modèle ci-dessus:

$$M = AZ + B$$

M est la mesure calculée, Z l'altitude calculée, A une inconnue, B la seconde inconnue. On a cherché à éliminer l'inconnue A en remarquant que :

$$A = dp/dz$$

M est la mesure, p la pression et Z l'altitude ; si on peut écrire :

$$M = k.p.$$

k étant un coefficient de proportionnalité quelconque on obtient:

$$k.A. = dM/dz$$ on a en outre

$$dp/dz = -g.p\ /R.T \quad \text{et} \quad dM/dz = -g.M/R.T$$

ce qui fait disparaître le coefficient de proportionnalité k, avec, dans ces relations:

g accélération de la pesanteur m/sec
R constante des gaz (m, sec, °K)
T température de l'air en degrés KELVIN (°K).

La constante A pouvait être connue en ne mesurant, en plus de M, la mesure, que la température extérieure T°K

M était, dans ce cas, la mesure moyenne pour une bande ou tout pour le chantier, qui était facile à calculer.

9.5.4. PENTE DE L'ISOBARE.

Pour les mêmes raisons que celles exposées précédemment on a donc adopté une inconnue Bb par bande.

Il s'agissait de savoir si, comme le font la plupart des auteurs, il convenait de tenir compte d'une pente de l'isobare, en compliquant le modèle, en lui donnant un terme supplémentaire fonction linéaire du temps, ou de l'abscisse du centre du cliché, comme le préconise le Professeur ACKERMANN [33].

Pour cela on avait traité les résidus d'ajustement obtenus par un calcul fait sans ce terme linéaire, pour voir si des systématismes pouvaient y être détectés. La conclusion sur les trois chantiers traités était totalement négative, ce qui ne signifiait pas, seulement, que le phénomène était un simple artefact, mais simplement qu'il n'était pas présent sur les chantiers présentés.

En effet, la longueur des bandes était comprise entre 40 et 50 km, qui étaient parcourus en cinq minutes, les résidus obtenus étaient plus voisins d'une fluctuation aléatoire de l'isobare que d'une pente.

Si on voulait réellement compliquer le modèle, comme le suggèrent certains auteurs [29 BROWN], à l'aide de termes de degrés plus élevés que le premier, il faudrait disposer de points d'appuis plus nombreux. Cette action deviendrait inconséquente, comme on l'a signalé plus haut, les points d'appui nécessaires pour déterminer les paramètres de ce modèle pouvant être mieux utilisés à appuyer directement le bloc [8 KUBIK]. On est, de surcroît, pas assuré qu'une telle complication n'entraînerait pas de couplage avec les inconnues de systématisme.

Finalement, on s'est laissé la possibilité de modéliser cette mesure, sans prendre directement en compte une pente de l'isobare, mais en faisant intervenir la variable temps, on aurait, ainsi:

$$M = dM/dZ \ .Z + B + C.t$$

dM/dZ serait donné par le calcul à partir d'une mesure de la température T°K.

Le temps t, interviendrait, C étant une nouvelle inconnue dB/dt, par contre, il ne serait plus nécessaire de prévoir une inconnue Bb par bande mais une seule: B pour tout le chantier.

9.6. TRAITEMENT DES INFORMATIONS

En chaque sommet il avait été fait plusieurs mesures simultanées de pression, pour le premier chantier le Service des Activités Aériennes avait communiqué directement la moyenne arithmétique de ces mesures, pour les chantiers suivants il avait, à l'inverse, donné le détail des mesures. par conséquent, les mesures n'ont pas fait l'objet d'un traitement a priori particulier à la SOUTERRAINE, mais à LUNEL, à VICHY, à ALBERTVILLE, MANOSQUE et en GUYANE, où elles étaient données séparement sur un même sommet,

elles avaient servi à éliminer les séquences fausses. En effet les mesures étaient, pour ces derniers chantiers, au nombre de six par sommet perspectif, on avait fait la moyenne arithmétique, mis en évidence la dispersion, et conservé chaque mesure individuelle pour un examen ultérieur. Bien entendu, ceci avait été fait pour cinq chantiers, et les deux statoscopes, soit pour dix séries de mesures.

Pas plus que lors les essais en vol du 13 Août 1987, l'examen de la dispersion des mesures brutes n'avait permis de départager les deux statoscopes. On attendait que le second capteur de pression soit plus précis que le premier, rien à ce point de l'étude ne laissait prévoir un tel résultat. Les deux capteurs CROUZET bien que de conceptions très différentes, donnaient des résultats comparables, la précision du résultat ne dépendait probablement pas, de façon déterminante, de celle des mesures de l'appareil.

Par contre comme on disposait de deux mesures par sommet provenant de deux appareils n'utilisant pas le même principe physique il était possible d'étudier leur dispersion sur une mesure pour mettre en évidence les causes extérieures d'erreurs qui ne sauraient leur être imputée. En effet sur de nombreux chantiers, comme on pourra la vérifier aisément, les dispersion sont cohérentes sur un chantier, mais différentes d'un chantier à l'autre.

On a voulu vérifier si cet état de chose était dû à des causes extérieures aux appareils de mesure eux-mêmes; pour cela on a comparé successivement les mesures des deux statoscope sur un même sommet perspectif en corrélant une catégorie de mesure par rapport à l'autre par une relation linéaire:

Si M_1 et M_2 représentent les mesures faites par les statoscopes 1 et 2

et Mc_1 et Mc_2 representent les mêmes quantités calculées à l'aide de l'autre mesure.

On peut écrire une relation:

$$Mc_2 = A.M_1 + B$$

et en étudiant les dispersion σ_2 écart quadratique moyen des résidus:

$v_2 = M_2 - Mc_2$ puis en permuttant 1 et 2 on peut calculert σ_1

L'écart-type entre les deux catégories de mesures était, à MANOSQUE de:

0,51m soit une erreur sur une des deux mesures de 0,36m en supposant que les deux écarts-types soient les mêmes.

On doit en outre remarquer que cette erreur globalise la composition de deux erreurs: l'une venant des mesures elles-mêmes, l'autre provenant du défaut de la modélisation ci-dessus. ceci démontre, presqu'à l'évidence, que la principale cause de dispersion ne provient pas du manque de précision des appareils

de mesure eux-mêmes mais de causes extérieures comme d'une variation aléatoire de l'isobare.

En outre cet écart-type représentait 3 Pa quantité assez remarquable par sa petitesse, soit environ 300gr au m^2.

Il ne serait donc pas prudent, comme l'ont fait certain auteurs, d'espérer un augmentation de la précision des mesures des capteurs de pression à des altitudes inférieures à 5000m du fait de l'augmentation de dM/dZ lorsque l'altitude diminue, si on entrait alors dans des zones où les turbulences atmosphériques seraient plus fortes, ces turbulences pouvant bien être le moteur des variations aléatoires de l'isobare.

A l'inverse il serait tout à fait possible que contrairement à ce que pensent ces mêmes auteurs la précision des mesures de l'altitude par les capteurs de pression ne diminue pas si l'altitude de prise de vues augmentait la perte de précision inévitable sur dM/dZ étant compensée par une meilleure stabilité de l'isobare. Ceci pourrait présenter un avantage absolument certain pour les travaux aux petites et moyennes échelles, alléger considérablement la préparation au sol de ces chantiers et, peut être, faire perdre tout intérêt au procédé de l'A.P.R.

9.6.1. ESSAI D'ELIMINATION DES FAUTES DES MESURES DES CAPTEURS DE PRESSION.

On avait, jusqu'ici, éliminé les mesures statoscope, considérées comme douteuses, à l'aide du seul critère de la dispersion des six mesures faites à chaque sommet, sans pour autant parvenir à un résultat totalement fiable, en ce sens que la condition pour rendre un groupe de six mesures recevable n'était pas assez sévère pour éliminer toutes les fautes; par contre, en abaissant la limite de la tolérance on éliminait des mesures que la compensation générale indiquait, a posteriori, comme fiables. On avait voulu rechercher des critères d'élimination qui complèteraient ce qui était déjà fait à partir de la dispersion des six mesures, mais sans rejeter des points qui seraient corrects.

La procédure qu'on va présenter avait été utilisée sur le bloc d'ALBERTVILLE avec un succès total, toutefois les mesures des deux capteurs de pression, sur ce chantier, étaient très bonnes ce qui peut expliquer ce résultat et ne pas apporter la preuve que la méthode proposée soit, définitivement, la bonne.

Les premiers critères d'élimination avaient été mis au point en examinant les séries des mesures des capteurs, elles étaient au nombre de Trois :

Si on classait, au préalable, les six mesures faites en un sommet, par ordre des valeurs mesurées croissantes, et si on appellait médiane interieure la moyenne arithmétique des deux mesures classées 3ème et 4ème, et médiane "exterieure" la moyenne arithmétique entre les mesures classées 1ère et 6ème.

1/ Ecart quadratique moyen trop élevé, supérieur ou égal à 1,50m (Déjà largement expérimenté sur les différents

blocs).

2/ Moyenne arithmétique des mesures qui s'écartait de la médiane interieure, pour s'intercaler hors de l'intervalle compris entre les deux mesures encadrant cette médiane.

3/ Médiane exterieure, ou demi-intervalle des mesures, qui ne serait pas comprise dans ce même intervalle intérieur.

doivent se trouver la moyenne arithmétique et la médiane exterieure.

Précisons bien que l'élimination visait l'ensemble des six mesures et non l'une seulement ou plusieurs d'entre elles comme cela a été fait, à tort, à notre avis, sur les blocs de GUYANE (disons tout de suite qu'il n'était guère possible de faire autrement, 90% des mesures auraient été éliminées !).

On va donner tout le détail des mesures éliminées sur ALBERTVILLE pour illustrer ce qui précède.

Sommet	Mesures	Moyenne Arithmét	Ecart type	Médiane Interne	Médiane Externe	Résidus d'ajustt
31	427 442 582 617 632 655	559*	100* 2,70m	605	541*	-2,89m
31	8,68 8,87 9,18 9,21 9,34 9,34	9,10*	0,27* 3,31m	9,20	9,01*	-3,65m

67	684 723 734 816 824 828	768	62* 1,68m	775	758	-7,42m
	,03 ,25 ,43 ,46 ,53 ,56	,38*	,20* 2,48m	,45	,30*	-7,40m
77	267 305 308 314 327 333	309	23 0,63m	311	300*	1,93m
	,21 ,28 ,31 ,34 ,43 ,46	,34	,09 1,15m	,325	,34	0,78m
125	243 264 274 280 327 344	289*	39 1,05m	277	293*	-3,97m
	,15 ,28 ,28 ,31 ,31 ,31	,27*	0,75m	,295	,23*	-3,17m

Les valeurs des moyennes ou des médianes marquées d'un astérisque (*) étaient celles qui entraînaient l'élimination de l'ensemble des mesures, on remarquait que seule la seconde mesure du capteur au sommet 77 était recevable, alors que la première avait été rejetée.

Sur le sommet 31 les mesures du premier capteur de pression se dispersaient trop, la moyenne arithmétique et la médiane interieure ne coïncidaient pas, la médiane exterieure et la médiane interieuree non plus: ce point était éliminé et les résidus d'ajustement montraient, a posteriori, que la décision était bonne; les observations et les conclusions étaient identiques sur les mesures du second statoscope.

Sur le sommet 67 la dispersion était un peu forte et ce seul critère aurait dû faire éliminer les mesures du premier capteur, par contre , pour le second, la moyenne arithmétique et la médiane externe sortaient de la zone de la médiane interne: les résidus d'ajustement étaient très importants et confirmaient les critères d'élimination choisis.

Sur le sommet 77 il était intéressant de noter que les mesures du premier capteur seraient éliminées car la médiane exterieure sortirait de la fourchette encadrant la médiane interieure, par contre les mesures du second capteur seraient, à la limite, acceptables; les résidus d'ajustement confirmaient ces décisions.

Sur le sommet 125 il était aussi intéressant de noter que la dispersion seule n'aurait pas permis d'éliminer ce point: pour le premier capteur il y avait non coïncidence entre la moyenne arithmétique et la médiane intérieure, et de la médiane exterieure avec la zone médiane interieure, pour le second il n'y avait que la médiane exterieure qui ne tombait pas dans cette même zone et pourtant, à l'issue des calculs de compensation, les résidus d'ajustement sur ce sommet étaient très élevés, ce point devait donc bien être éliminé, même si un seul des trois critères imposait cette décision.

4°/ On a dû également vérifier si sur certaines séries de mesures n'existaient pas des tendances anormales que dans la réception des produit industriels on nomme des "runs",ce sont des séries de mesures sortant de l'appareil de mesure systématiquement. croissantes, décroissantes, ou, enfin, toutes identiques. Ce sont des signes évidents d'un dérèglement de l'appareil; un cas semblable s'est présenté à VAISON-LA-ROMAINE.

9.7. LES CHANTIERS D'AEROTRIAGULATION APPUYES NORMALEMENT AU SOL ET SERVANT D'ELEMENTS DE COMPARAISON.

Les commentaires sur les calculs d'aérotriangulation des chantiers servant de comparaison pourront être relevés dans les chapitres correspondants des ANNEXES; sur les points de contrôle on relèvera les écarts moyens quadratiques suivants:

CHANTIERS	X	Y	Z
Guyane	0,61	1,08	0,56
Souterraine	0,69	0,69	0,46
Lunel	0,75	0,60	0,43
Vichy	0,55	0,55	0,43
Manosque	0,95	0,75	0,60
Albertville	1,02	0,85	0,80

9.8. LES RESULTATS

9.8.1.LA SOUTERRAINE CONTRIBUTION DES MESURES STATOSCOPE SEULES DANS LA COMPENSATION.

COMMENTAIRES

Rappelons que le bloc était appuyé sur quatre points au sol, connus en altimétrie et en planimétrie, ces points étaient placés en liaison des bandes, tous les autres points étaient placés comme points de contrôle, c'est-à-dire "désactivés", et permettaient d'apprécier la précision de l'ajustement, dans tout le champ du bloc en l'absence de mesures aéroportées.

Rappelons qu'ensuite, tous les points au sol dont les coordonnées étaient connues, soit en altimétrie, soit en planimétrie, sauf quatre d'entre eux, les appuis, étaient toujours considérés comme des points de contrôle permettant d'apprécier la précision des mesures statoscope qu'on avaient introduites.

Le bloc avait été calculé sur ses quatre points d'appui, seuls, il était complètement déformé, comme on le verra sur la figure 2, sur laquelle on avait reporté, au droit de chaque sommet perspectif, les déformations relevées. La figure 12 porte, sur trois colonnes, les altitudes calculées des sommets perspectifs : en première colonne en utilisant tous les points en appui, en seconde colonne le bloc n'est appuyé que sur quatre appuis placés comme indiqué ci-dessus, et en troisième colonne le bloc est appuyé sur les quatre mêmes appuis, et sur les mesures statoscope, les différences avec les résultats de la première colonne étaient, alors, négligeables, à l'échelle considérée.

RESULTATS

Résidus quadratique moyen d'ajustement en altimétrie seulement	
Sur les points d'appui (4)	0,40 m
Sur les mesures statoscope (59)	1,05 m

Ces résultats étaient tout à fait comparables à ceux cités par [31 FAIG]

Ecarts moyens quadratiques en altimétrie :		
Sur les points de controle (129)	0,76 m	biais 0,03 m
Rappel on avait ,avec des points d'appui au sol et dans les mêmes conditions	0,46m	

On avait noté la présence de trois résidus élevés de 1,80 m qui apparaissaient, à la fois dans le calcul d'étalonnage, de vérification, et dans le présent calcul.

Le résultat était évidemment très spectaculaire. On avait trouvé, dans la littérature, une remarque faite par le Professeur ACKERMANN [33] qui confirmait le fait étonnant d'avoir des résultats meilleurs , sur les points de contrôle, que sur les mesures elles-mêmes et qui expliquait, par des simulations, pourquoi d'un écart quadratique moyen compris entre 1 m et 1,20 m sur les sommets perspectifs, on pouvait parvenir à un

Figure 12

Altitudes des Sommets perspectifs

LA SOUTERRAINE

FR0523

Tous les Points en Appui	Appuis sur Quatre Points	Appui sur quatre Points et Statoscope
Z	Z	Z
5060.38	5033.06	5060.06
5056.51	5036.62	5056.13
5051.50	5037.87	5051.38
5060.24	5061.64	5060.22
5053.38	5053.86	5058.56
5050.53	5048.73	5050.60
5054.97	5055.07	5055.17
5054.19	5055.36	5054.41
5052.15	5053.32	5052.44
5053.30	5053.27	5053.68
5054.22	5051.37	5054.69
5052.05	5042.24	5052.50
5052.97	5042.33	5053.56
5052.80	5035.64	5053.35
5049.12	5024.19	5050.22
5057.40	5044.07	5052.19
5054.59	5049.13	5055.65
5052.39	5053.92	5053.76
5052.77	5058.30	5053.58
5055.67	5063.31	5056.43
5050.73	5063.10	5051.47
5052.28	5066.13	5053.00
5052.78	5066.35	5053.51
5049.72	5063.03	5050.43
5049.14	5060.36	5049.75
5050.82	5058.33	5051.43
5053.20	5057.04	5053.79
5051.23	5049.09	5051.80
5043.62	5040.25	5049.11
5050.74	5035.31	5051.13
5044.67	5034.87	5044.53
5045.19	5040.32	5045.27
5038.71	5043.47	5038.96
5038.06	5047.89	5038.38
5041.32	5035.50	5041.85
5040.39	5057.61	5041.22
5041.49	5060.06	5041.86
5038.05	5057.20	5038.43
5041.12	5059.79	5041.48
5041.71	5058.81	5042.07
5038.27	5052.74	5038.56
5042.54	5056.19	5043.64
5040.21	5045.79	5040.18
5041.41	5040.62	5041.25
5040.17	5031.46	5039.91
5040.92	5033.08	5040.81
5040.59	5040.87	5040.58
5038.50	5044.49	5038.61
5040.11	5050.92	5040.25
5038.26	5052.79	5038.42
5038.35	5055.43	5038.62
5035.72	5054.30	5035.89
5046.11	5069.14	5046.26
5044.09	5062.61	5044.29
5041.54	5059.35	5041.76
5046.34	5060.09	5046.63
5048.81	5058.27	5048.99
5041.47	5046.79	5041.74
5048.48		5048.06
5044.86		

écart de 0,76 m, sur les points de contrôle. Il faut bien préciser que les estimations des écarts-types "a posteriori" faites selon la méthode préconisée par M.HOTTIER donnent des résultats de l'ordre de 0,50m.

Le choix exclusif des écarts obtenus sur les points de contrôle pour apprécier la précision obtenue était donc prudent.

9.8.2. MESURES DES CAPTEURS DE PRESSION A LUNEL ET A VICHY.

Signalons d'abord que ces deux blocs étaient les premiers blocs homogènes qu'on ait traîtés.

Après introduction des mesures statoscope dans le calcul, mais sans les rendre actives dans la compensation, la grande déception a été, pour LUNEL et VICHY, de trouver plus de "fautes" que sur la feuille de la SOUTERRAINE.

Ces "fautes" pourraient être décrites comme des écarts anormalement élevés affichés en certains sommets, alors que les sommets voisins avaient apparemment des écarts plus conformes à ce qui était attendu; précisons bien qu'à ce stade du calcul il ne s'agissait que d'écarts et non de résidus d'ajustement puisque les mesures aéroportées étaient "désactivées" et ne participaient pas encore à la compensation; on doit en outre préciser que l'écart-type "a priori" sur les mesures statoscope étant, d'après les résultats de la SOUTERRAINE, de 1,20m, tout écart supérieur à 3,50 m pouvait, normalement, être considéré comme suspect.

Certaines de ces "fautes" auraient pu être mises en évidence a priori en examinant la dispersion des mesures brutes sur le sommet, surtout sur le chantier de LUNEL, où elles étaient les plus nombreuses, d'autres n'auraient pas pu être éliminées par ce moyen avant l'ajustement.

Beaucoup de ces fautes, mais pas toutes, étaient communes au même sommet, pour les deux statoscopes, on pourrait penser à une même cause et on soupçonnerait, évidemment, les accélérations verticales, ou des défauts dans la prise de pression qui était commune aux deux statoscopes, si les coïncidences étaient plus nombreuses; de surcroît elles étaient en plus grand nombre à LUNEL qu'à VICHY sans raison apparente ou connue, alors que l'équipement de mesure était exactement le même.

On s'est tourné vers les mesures de vitesses verticales, données par les mesures de SERCEL, sans rien trouver qui puisse confirmer le premier soupçon, ou qui puisse signaler les mesures sur lesquelles on pourrait avoir des doutes, par suite d'accélérations verticales trop fortes.

Le Service des activités aériennes (SAA) pense, à l'avenir, pouvoir installer un accéléromètre vertical, qui pourrait permettre de marquer les mesures qui devraient faire l'objet d'un doute légitime, pour les désactiver, au moins temporairement.

9.8.3. CHANTIER DE LUNEL POUR LES CAPTEURS DE PRESSION.

Sur 75 clichés 73 sommets perspectifs bénéficiaient d'une mesure statoscope :

- Huit mesures discordantes étaient communes aux deux statoscopes : 3 7 53 64 68 70 74 75
- Six de ces sommets perspectifs auraient été signalés par des dispersions anormales des mesures brutes des deux statoscopes c'étaient les numéros suivants :

7 53 68 70 74 75

.... mis en regard des précédents.

Sur le premier statoscope, le plus ancien, c'est-à-dire le même appareil que celui qui avait été utilisé pendant le vol de la SOUTERRAINE, on aurait dû éliminer six mesures supplémentaires sans que rien, ni la dispersion, ni le second statoscope, ne puisse étayer cette décision, qui était prise simplement en fonction des écarts constatés au sommet considéré et de la valeur de l'écart-type a priori.

Sur la série des mesures du second statoscope on aurait éliminé, dans les mêmes conditions, quatre d'entre elles.

On avait ensuite fait participer les mesures statoscope à la compensation en "désactivant" la majorité des appuis de terrain, c'est-à-dire en transformant ces points d'appui en points de vérification, dans des proportions variables qui seront décrites plus loin; on avait d'abord vérifié que, dans ces conditions, on serait amené à éliminer les mêmes points, ce qui s'était parfaitement vérifié.

On avait essayé une procédure de "dépondération" automatique, et de rejet des mesures anormales et des mesures très éloignées de la valeur calculée, inspirée de la méthode dite "Danoise" [34 HOTTIER, 35 WERNER, 36 HAKIM, 37 CHONG] sans y trouver de réels avantages, en comparaison de l'élimination manuelle, ce qui permettait toutefois de signaler trois faits sur lesquels les auteurs étaient restés muets :

1. Tant qu'une mesure était affectée d'un poids plus faible sans être éliminée, sa présence augmentait le résidu quadratique moyen quand on se rapprochait de la solution définitive, ce qui était normal mais choquant. La solution "robuste" n'est pas la solution des moindres carrés; laquelle reprenait ses droits, par contre, lorsque la mesure était éliminée.

2. Avant de procéder à la "dépondération" automatique des mesures, il était absolument nécessaire d'avoir obtenu un équilibre, et terminé les itérations, en dehors de cette procédure.

Après élimination des "fautes" l'exactitude obtenue était tout à fait comparable pour les deux statoscopes elle représentait un résidu quadratique moyen de 1,20 m.

3. On améliorait les résultats sur les points de contrôle en se donnant des écarts-type a priori très sévères, c'est-à-dire en "dépondérant" plus de points qu'on ne le ferait à la main. En outre les points éliminés, l'étaient d'emblée, c'est-à-dire que le résultat était le même que celui obtenu par les moyens manuels.

Le programme qu'on avait écrit était particulièrement simple; il n'était, en effet, pas question de remettre en cause toute la méthode et, surtout, la chaîne de compensation du programme FAISCEAUX, mais uniquement de greffer quelques instruc-

tions permettant de traiter les mesures des capteurs de pression par une méthode "robuste" sans être obligé de faire de même pour les autres mesures; il fallait donc que rien ne soit changé lorsque les résidus des mesures des capteurs de pression restaient dans des limites tolérables, pour n'intervenir que lorsque cela devenait nécessaire. On avait donc préféré passer par l'artifice qui consistait à altérer les résidus eux-mêmes.

Dans le corps du programme principal on avait introduit une question: compensation robuste O/N, la réponse par défaut étant négative. En cas de réponse positive, le programme enchaîné après le calcul de chaque résidu des capteurs de pression, qui ne comportait qu'une seule ligne, était le suivant:

```
|r| >k1*σo ? r <-- Robuste(σo, r) ¿

|[Robuste(σo,r)
        signe =  r/|r|

           r<---|r|

           r<---k2*σo - r

           r < 0 ? r<---0 ¿
           r<---r * signe    ]|
```

Les coefficients k_1 et k_2 indiquaient, pour le premier la limite à partir de laquelle le résidu devenait suspect, on l'avait fixé à 3 pour s'apercevoir, par la suite, en voulant affiner cette valeur par des considérations théoriques, qu'elle n'avait aucun besoin de l'être, les résultats étant peu sensibles à ses variations; pour le second, la limite à partir de laquelle les mesures ne pourraient plus influencer la compensation, en d'autres termes au-delà de laquelle elles seraient"désactivées", on l'avait fixé à 6 avec les mêmes commentaires que pour le premier.

Les méthodes proposées par les auteurs [38 KUBIK] étaient sensiblement différentes: alors que dans la méthode des moindres carrés on cherche à minimiser:

$$\sum_{i=1}^{i=n} r_i^2$$, ils proposaient de minimiser une fonction de r_i:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \Phi(r_i) \text{ minimum}$$

Les exemples pour le choix de $\Phi(r_i)$ étaient les suivants:

$\Phi(r_i)=|r|$ et ,

$\Phi(r_i)= r_i^2 * \exp(-r_i^2/a^2)$ pour procéder comme on l'a fait il suffirait d'écrire:

r_i<---$\sqrt{|r_i|}$ pour la première méthode qui est celle de la

somme minimale des résidus; et,

$r_i \leftarrow r_i * \sqrt{(\exp(-r_i^2/a^2))}$, alors que, traditionnellement, on donne un "poids"au résidu.

Si on laissait tous les points d'appui de terrain "actifs", c'est-à-dire s'ils participaient tous à la compensation, l'apport des mesures statoscope restait négligeable.

par contre si on "désactivait" les points d'appui pour les transformer en points de contrôle, pour ne conserver qu'un équipement léger, et même très léger, c'est-à-dire n'avoir que peu de points d'appui, on voyait apparaître l'apport des mesures statoscope.

Avec cinq points d'appui planimétriques, et cinq points d'appui altimétriques, tous les autres points étant utilisés comme contrôles, on obtenait une précision de :

0,66 m d'écart-type en altimétrie et de 0,90 m d'écart-type en planimétrie.
Pour, dans les mêmes conditions , avec des points d'appui au sol très nombreux:
0,43m d'écart-type en altimétrie et de 0,75m et 0,60m en planimétrie.

La position des points d'appui altimétriques avait un très grande importance, la configuration adoptée comportait un point central, le point le plus important, car sa surface d'influence était la plus étendue, et quatre points aux angles dont la surface d'influence était la plus faible; les zones défavorisées étaient donc les milieux des bords, c'était d'ailleurs en ces points qu'on relevait les résidus les plus importants [voir 5 et 6].

Curieusement, en ajoutant des points d'appui de façon quelconque, mais en dehors des milieux des bords et de toutes façons hors des zones "défavorisées", on pouvait arriver à dégrader les résultats au lieu de les améliorer ! On était probablement tombé, d'emblée, sur un ensemble de points d'appui particulièrement bons et en accord avec les points de contrôle, mais en grande partie par hasard.

Il serait donc prudent de ne pas trop compter sur ce résultat qui pourrait être exceptionnel, et de ne tenir pour acquis qu'un **écart-type en altimétrie de 0,76 m**, obtenu en ajoutant des points d'appui altimétriques pour améliorer le résultat; les résidus moyens planimétriques étant toujours de l'ordre du mètre.

En outre, il paraîtrait nécessaire de se donner les écarts-types "a priori" suivants, quand on a très peu de points d'appui :

On se fixerait un écart-type a priori sur la position des points d'appui, tout à fait irréaliste pour des points repiqués, de $\sigma_0 = 0.25$ m et même 0.20m en altimétrie et en planimétrie, par exemple, et on noterait, au premier tour de calcul, les résidus quadratiques moyens obtenus sur le réseau

photogrammétrique et le statoscope.

Ils seraient recalculés avec ces valeurs prises comme écarts-type a priori au cours des calculs suivants, sauf pour les points d'appui qui conserveraient les valeurs adoptées plus haut, tant que ces points d'appui resteraient en petit nombre.

Sans cette précaution le résidu quadratique moyen sur les points de contrôle augmenterait, le résidu moyen qui est un biais sur les points de contrôle prenant alors une valeur non négligeable; la valeur :

(Résidu quadratique moyen)² - (Résidu moyen)²

ne variant pas beaucoup en fonction du poids donné aux points d'appui, c'est la valeur du résidu moyen qui était sensible aux poids donné aux points d'appui, lorsqu'ils étaient en petit nombre.

Dans le cas particulier qui nous intéressait, on avait obtenu les résidus d'ajustement suivants :

σ_0 = 7µm pour le réseau photogrammétrique et σ_0 = 1,20m pour le statoscope.

En adoptant ces valeurs comme écarts-types a priori , pour les compensations suivantes, on obtenait un résultat optimal sur les points de contrôle (Les valeurs indiquées ne valent que pour le chantier en cause) .

Lorsque les points d'appui de terrain devenaient plus nombreux on adoptait progressivement une valeur plus réaliste pour leur écart-type a priori, soit de 0,65 à 0,70m en planimétrie et en altimétrie.

En doublant le nombre des points d'appui soit huit points en planimétrie et onze points en altimétrie la précision était nettement améliorée, les résidus quadratiques moyens sur les points de contrôle descendaient à :

0,70 m en planimétrie et 0,56 m en altimétrie.

pour

0,75m 0,60m 0,43m avec le réseau complet des appuis au sol

Ces résultats étant assez exceptionnels, il convenait de cerner très précisément le mérite revenant à chaque disposition prise, le statoscope ne pouvant pas être crédité de l'ensemble des améliorations contatées.

1°/ Effet des bandes transversales: en les retirant et en réduisant au maximum le nombre des appuis le résidu quadratique moyen sur les points de contrôle altimétrique passait de 0,66 m avec les bandes transversales, à 1,20 m et même 1,50 m sans les bandes transversales, la deuxième valeur donnée correspondant à la configuration de quatre points d'appui la moins favorable.

On remarquait que l'apport des bandes transversales était très important: en leur absence les mesures statoscope resteraient peu efficaces car toutes les bandes ne seraient pas tenues par des appuis, la transmission des inconnues de statoscope, qui étaient au nombre de une par bande se ferait très mal par les seuls points de liaison entre bandes; il était évidemment possible d'incriminer le modèle, qui n'avait peut être pas besoin d'une inconnue par bande; dans ce cas il faudrait le corriger en introduisant une dérive dans le temps du paramètre de statoscope.

La première et la dernière bande EST-OUEST étaient correctement tenues alors que les autres bandes (2 et 3) n'étaient pas encadrées par des appuis mais seulement par des bandes. En outre, il ne fallait pas négliger le fait que la première bande avait été reprise par la bande N°5 ce qui était une cause supplémentaire de manque de liaison. Comme on l'a déjà remarqué plus haut, il serait possible qu'en ne conservant qu'une inconnue de statoscope pour l'ensemble du bloc on parvienne à de meilleurs résultats sans les bandes transversales, au prix inévitable, d'une augmentation des résidus moyens quadratiques des mesures statoscopes, car le modèle fonctionnel simplifié s'écarterait encore plus de la réalité.

2°/ On vient de voir l'effet favorable des bandes transversales. On peut aussi créditer les paramètres de systématisme d'une partie du résultat.

La qualité du bloc, même privé d'appuis sur le terrain et de mesures aéroportées, étant encore assez bonne, on avait cherché à identifier les raisons de cet état de choses.

On avait normalement pensé à l'influence des paramètres de systématisme, en les "inactivant", on obtenait, en effet, des déformations très importantes soit plus de 8 mètres au centre du bloc.

Il se trouvait donc que, pour ce bloc particulier, ces paramètres étaient très efficaces; il fallait souligner que ce n'était pas toujours le cas et qu'il restait parfois, malgré la présence, au cours des calculs, des paramètres de systématisme, des biais résiduels importants.

Ces biais pouvaient être calculés entre les mesures terrain et les mesures cliché en donnant successivement un poids fort aux unes et un poids faible aux autres, et inversement, on avait obtenu :

La Souterraine 1987	1,35 m	60 clichés
Magnac-Laval, la Souterraine 1986	2,07 m	94 clichés
Argenton-Bourganeuf 1986	2,62 m	194 clichés
Autre chantier	1,61 m	50 clichés
" "	1,74 m	57 clichés
" "	3,10 m	55 clichés
Lunel 1987	1,08 m	56 clichés
etc.....		

Tous ces chantiers avaient été, bien entendu, observés à la même échelle et à la même altitude. En dehors des variations de ce biais dûes à la surface du chantier qui se traduisaient par une augmentation du nombre des clichés, il existait des variations d'un chantier à l'autre, qui dépendaient de l'efficacité qu'avaient les paramètres de systématismes à représenter une situation particulière présente au cours du vol et/ou des opérations subséquentes, c'était un biais résiduel non modélisé.

9.8.4. CHANTIER DE VICHY POUR LES CAPTEURS DE PRESSION.

Un assez grand nombre de traits caractéristiques étaient communs aux deux opérations, on insistera donc, surtout, sur ce qui différenciait ce chantier du précédent; il comportait un peu moins de clichés, la première bande, bien que ne bénéficiant pas de mesures GPS n'avait pas été reprise, ce défaut n'ayant dû apparaître que plus tard, après le vol, il n'avait pas pu être corrigé. Il s'agissait très probablement d'un défaut d'enregistrement des mesures brutes dont l'absence ne permettait pas d'effectuer le calcul de lissage en retour .

Il ne comportait donc que 70 clichés, y compris les bandes NORD-SUD, et 57 clichés, non compris les bandes NORD-SUD.

Les mesures statoscope paraissaient meilleures que sur le chantier précédent; pour le premier statoscope on avait dû éliminer les sommets suivants:

73 97 101 105 111 117 127 147

et sur le second, les sommets suivants placés en regard des précédents:

73 87 97 101 147

La dispersion sur les mesures brutes aurait justifié l'élimination du sommet 65 qui avait été conservé, le sommet 73 aurait été conservé, il avait dû être éliminé ... etc, on va indiquer les points qui auraient été éliminés par l'examen de la dispersion des mesures brutes :

65 101 115 127 129

et pour le second statoscope :

65 101 115 127

Au total on peut dire qu'aucune des méthodes d'élimination "a priori" envisagées des sommets pour ces chantiers, et qui étaient seulement basées sur la dispersion des mesures, n'était entièrement fiable; on proposera une méthode d'élimination plus sévère, plus loin, qui aurait été très efficace sur les chantiers de LUNEL et de VICHY et d'ALBERTVILLE, mais tellement féroce pour le chantier de GUYANE, que 90% des mesures auraient dûes être éliminées, or ces dernières avaient, quand même, pu servir!

La précision des deux statoscopes était tout à fait comparable; toutefois, le second qui ne comportait que cinq sommets sur lesquels apparaissaient des écarts importants paraissait, sur ce chantier, plus fiable que le premier; les

résidus d'ajustement restant dans la limite de trois écarts-types a priori, on avait préféré essayer une méthode de compensation robuste; aucun point n'avait été finalement éliminé sur le second statoscope, les mesures hors tolérance avaient simplement été "dépondérées". Inversement, on avait éliminé manuellement les mesures des sommets où apparaissaient des écarts ou des résidus hors tolérance pour le premier statoscope.

En définitive, les résultats étaient tout à fait comparables, qu'il y ait élimination pure et simple ou "dépondération", sans doute parce que les mesures statoscope étaient assez nombreuses: les simulations montraient bien qu'au-delà d'un certain nombre de points d'appui placés à des emplacements stratégiques les points ajoutés n'apportaient plus aucun avantage; ceci ne devrait toutefois pas inciter à diminuer le nombre des sommets bénéficiant de mesures, en effet il faut rappeler que le but principal de la multiplication des appuis, au-delà des limites fixées par la pratique, n'est pas l'augmentation de la précision, mais l'élimination des fautes de mesure, de calcul, de saisie...etc inévitables . Il n'en restait pas moins qu'il n'y avait aucun inconvénient à être très sévère dans l'élimination des points statoscope douteux et qu'il était souhaitable de trouver des critères complémentaires d'élimination des mesures des capteurs de pression.

Comme pour le bloc précédent, l'apport des mesures statoscope, si on ne "désactivait" pas la plus grande partie des points d'appui, ne pouvait être que marginal.

En présence d'un équipement en points d'appui très léger, les mesures statoscope étaient très efficaces, on trouvait des résultats tout à fait semblables à ceux trouvés à LUNEL, à un détail qu'on a déjà évoqué :

Ce qui restait comparable c'était la différence :

(Résidu quadratique moyen)^2 - (Résidu moyen)^2

Le résidu moyen était variable, suivant le choix heureux, ou malheureux, des quelques points d'appui conservés, et de leur cohérence avec les points de contrôle et les points d'appui utilisés comme points de contrôle, c'est-à-dire désactivés.

On se rapportera à la figure 5, plus avant, pour les résultats altimétriques reportés à l'échelle du 1/160.000ème

Les résultats chiffrés étaient exactement les mêmes qu'à LUNEL.

9.8.5. LES MESURES STATOSCOPE EN GUYANE.

Ce paragraphe s'inspire largement d'une note technique de M.Ch.MEYER et de H.SEC [39] rédigée à l'issue des calculs de ce chantier de production.

Les données du statoscope avaient été organisées en un fichier capable d'être introduit dans la chaîne d'aérotriangulation, suivant la procédure mise au point au cours des expérimentations précédentes. La dispersion des six mesures faites en chaque sommet avait été calculée de manière à éliminer celles dépassant la tolérance. Sur ce chantier les mesures étaient très homogènes dans une bande, les mesures éliminées appartenaient toutes à des bandes observées après le 9 Septembre sur des sommets de numéro supérieur à 400, laissant à penser que le statoscope avait cessé de fonctionner après cette date .

Il avait été remarqué que les mesures éliminées "a priori", en raison de leur trop grande dispersion, présentaient un écart, avec les résultats de l'aérotriangulation supérieur à 5,00m; comme au cours des expériences qu'on a rapportées plus haut, certaines mesures qui n'avaient pas été éliminées a priori, car ne montrant pas de trop forte dispersion, avaient dû être éliminées "a posteriori", car elles donnaient de mauvais résultats, c'est-à-dire des résidus trop importants, lorsqu'elles étaient combinées avec l'aérotriangulation.

Les résidus moyens quadratiques d'ajustement aux points de statoscope avaient été de:

1,33m sur le bloc de St-LAURENT et de 1,23m sur le bloc voisin.

L'apport du statoscope avait pu être estimé de la manière suivante: les points d'appui altimétriques avaient tous été placés en contrôle, en ne conservant que les appuis "prébalisés" (C'est-à-dire équipés, avant le vol, d'un signal qui serait visible sur les photographies) connus dans leurs trois coordonnées, au nombre de onze pour ce bloc très important. La configuration des appuis était extrêmement mauvaise, les résultats étaient les suivants:

Ecarts quadratiques moyens aux points de contrôle : Sans mesures statoscope 1,90m Avec 1,25m.

On remarquait que le bloc se rapprochait du terrain lorsqu'on utilisait les mesures statoscope les résultats étaient encore plus spectaculaires lorsqu'on "désactivait" les modèles des systématismes de DUCLOUX:

Sans mesures statoscope	9,35m
Avec	1,82m.

On mesurait ainsi l'apport considérable des modèles de systématisme qui masquait, en partie, celui du statoscope. Il semblait essentiel pour des travaux de cette nature de profiter de toutes les occasions qui se présentaient pour obtenir le plus grand nombre possible de contrôles, d'autant que rien ne permettait de savoir, a priori, si les modèles DUCLOUX seraient très ou peu efficaces.

Un autre essai avait été mené en passant tous les points d'appui en altimétrie en contrôle, c'est-à-dire en les désactivant, sur la bordure OUEST du bloc: les cotes d'eau du MARONI, trouvées après calcul, étaient tout à fait correctes.

L'auteur en concluait qu'on aurait pu faire l'économie d'une partie des travaux de stéréopréparation, coûteux Outre-Mer et souvent longs et fatigants.

Les résultats ont été reportés sur le plan au 1/300.000ème de la figure 13.

9.9. RESUME DE L'ENSEMBLE DES RESULTATS ET CONCLUSIONS SUR LES MESURES DES CAPTEURS DE PRESSION ATMOSPHERIQUE (STATOSCOPES).

Les mesures des chantiers de GUYANE étaient un peu décevantes, par contre celles d'ALBERTVILLE, en tant que mesures effectuées en région montagneuse, de parcours difficile, étaient très prometteuses.

Il paraitrait, donc, indispensable de continuer, parallèlement la recherche sur les capteurs, les prises de pression, et des méthodes statistiquement correctes pour éliminer a priori les mesures fausses, pourvu qu'elles ne soient pas trop nombreuses comme en GUYANE. L'élimination de ces fautes, a posteriori, sera toujours un échec, car on ne saura jamais les conséquences des fautes qui n'auraient pas pu être détectées a priori ou a posteriori, et qui, par conséquent, subsisteraient dans les appuis du réseau, déséquilibrant la compensation.

Les méthodes de compensation robustes sur une partie des mesures, d'abord n'enseignent rien sur les raisons de l'élimination d'une mesure, mais aussi "fragilisent" les autres catégories de mesures, car si la faute n'est pas imputable à la mesure faisant l'objet de la compensation "robuste" c'est pourtant cette dernière, et elle seule , qui sera éliminée, la faute sera donc masquée et restera en place.

Il est fort possible que les causes pourront être trouvées sur les prises de pression et, peut être aussi, les capteurs, et/ou les accélérations verticales, par ceux qui sont chargés de faire ces mesures.

Le Professeur ACKERMANN rappelle, fort opportunément, que les mesures de pression atmosphériques sont les moins chères et les plus efficaces de mesures aéroportées. Ces raisons feront que les recherches seront toujours payantes en ce domaine.

Néanmoins, il conviendra, encore , de souligner que ces mesures seront toujours rapportées à une "surface

T LAURENT

GUYANE 87 BLOC 2 (AVEC MESURES STATO)

124VL
1:300000

Figure 13

isobare" plus ou moins précise et stable, dont les défauts sont soit de nature physique, soit de nature géométrique, il est à peu près certain qu'on ne pourra jamais en connaitre les causes exactes.

Inévitablement ces mesures, aussi précises puissent elles devenir, ne vaudront que ce que leur référentiel vaudra lui-même; il s'agira toujours d'une limite infranchissable au-delà de laquelle il sera inutile de pousser la précision des capteurs eux-mêmes si, de ce fait, leur exactitude reste limitée par l'indécision, elle aussi fondamentale, qui règnera sur l'origine de la mesure.

En première urgence il semble indispensable de relever la température à laquelle le vol a été fait afin d'estimer correctement la valeur du coefficient A = dM/dZ qui deviendrait ainsi une mesure, échappant à la compensation, et non une inconnue.

On peut résumer les résultats sur les mesures des capteurs de pression par le tableau suivant:

Ecarts-types sur les points de vérification		
Chantier	Réseau complet d'appuis au sol	réseau d'appuis réduit et capteur de pression
Souterraine	X-Y = 0,70 Z = 0,45	Pas de contrôle 0,75
Lunel	X-Y = 0,75 Z = 0,45	0,70 0,55
Vichy	X-Y = 0,55 Z = 0,45	0,70 0,55
Guyane	Néant	X= 0,60 Y= 1,10 Z= 0,55
Albertville	X-Y = 0,90 Z = 0,80	0,95 1,00
Manosque	X-Y = 0,90 Z = 0,60	0,95 1,00

Evidemment ces résultats sont arrondis aux 5 cm les plus proches.

10.
UTILISATION D'UN CAPTEUR DE PRESSION ET DE MESURES DE HAUTEURS DES SOMMETS PERSPECTIFS POUR APPUYER UN BLOC D'AEROTRIANGULATION

10.1. GENERALITES

Il s'agit de la reprise des chantiers de MAGNAC-LAVAL et d'ARGENTON-BOURGANEUF où les mesures du statoscope avaient été impossibles à réaliser.

On disposait donc pour les mesures de hauteur des sommets perspectifs par laser d'une assez grande expérience, et on connaissait la précision qu'on pouvait en attendre.

Ces essais n'avaient été menés que sur un seul chantier: LA SOUTERRAINE décrit en ANNEXE.

Il en est de même pour les calculs d'aérotriangulation; de plus le traîtement des informations s'est fait comme indiqué dans les chapitres précédents, notamment pour le report des points laser sur les photographies et les procédures d'élimination "a priori" des fautes commises sur ces mesures

10.2. CALCULS D'AEROTRIANGULATION POUR LE BLOC APPUYE SUR DE NOMBREUX POINTS AU SOL

Ces calculs sont développés en ANNEXE on ne fera que rappeler ici les résultats les plus significatifs:

	Ecarts-types sur les points de vérification		
	X	Y	Z
LA SOUTERRAINE	0,69m	0,69m	0,46m

10.3. LES MESURES AEROPORTEES

On avait, d'abord, recherché la précision des mesures laser et statoscopes, en les comparant aux mêmes éléments, calculés par voie photogrammétrique.

10.3.1. STATOSCOPE

1ère bande	écart quadratique moyen	: 1,40 m
2ème bande	" " "	: 1,59 m
3ème bande	(1ère partie reprise)	: 0,32 m
.....	(2ème partie)	: 1,08 m
4ème bande	écart quadratique moyen	: 0,67 m
Ensemble sur 59 mesures conservées emq		: 1,20 m

Les mesures réelles étaient, alors, les tensions électriques ce qui représentait environ 0,3 à 0,4 millivolts avec la large fourchette de 0,1 à 0,5 millivolts, on avait dû éliminer une mesure, et on avait détecté un décalage du rang des mesures par rapport au rang des sommets, sans trouver d'explication satisfaisante à cet incident très grave.

Ces résultats étaient cohérents avec ceux tirés de la littérature technique surtout avec ceux des Allemands [31 FAIG] mais pas avec ceux de [28 BLAIS & CHAPMANN].

10.3.2. LASER

On se reportera aux résultats détaillés donnés dans le chapitre précédent, qui concluait que:

l'écart quadratique moyen était de 1,80m pour un une constante de 3,80m

Valeur qui ne sera pas entrée dans la compensation telle quelle mais qui sera considérée comme une inconnue. Dans le cas contraire on lui donnerait un poids trop fort et on introduirait un systématisme dans la compensation. Par ailleurs 40% des mesures avait été éliminé.

10.4. RESULTATS DE LA COMPENSATION DU BLOC APPUYE SUR QUELQUES POINTS AU SOL ET SUR LES MESURES AEROPORTEES

CONTRIBUTION DES MESURES STATOSCOPE ET DES MESURES LASER DANS LA COMPENSATION .

On avait, comme au paragraphe précédent, éliminé, a priori, toutes les mesures reconnues comme fausses.

Ce qui supposait qu'ultérieurement, on ait mis au point une méthode fiable d'élimination des mesures fausses, on verra plus loin que cela était possible pour le statoscope, mais plus difficile et plus laborieux pour les mesures laser, car pour l'exemple présenté on y était parvenu au prix d'une procédure assez longue qui risquerait, pour cela, de ne pas plaire aux praticiens (voir au chapitre précédent).

En outre le problème de fond était celui de la compétition entre mesures faites sur les clichés, de loin les plus nombreuses, et les mesures d'altitude du statoscope, les mesures de hauteur du laser, et à un degré bien moindre les mesures géodésiques de terrain, ces dernières n'intervenant réellement que pour fixer les constantes inconnues, sans entrer vraiment en concurrence, lorsqu'elles ne sont pas très redondantes, avec les autres mesures.

Les résultats obtenus seraient tout à fait satisfaisants :

Résidus quadratiques moyens sur les altitudes	
Des points d'impact laser	0,80 m
Des sommets de faisceaux (statoscopes)	0,60 m
Des points d'appui	0,32 m

Ecarts quadratiques moyens sur les points de contrôle
0,48m biais 0,03m
Pour **0,48m** avec tous les points d'appui au sol

Les résultats sont reportés graphiquement sur le plan au 1/200.000ème de la figure 14. Les résultats seraient tout à fait comparables à ceux obtenus avec une préparation normale.

Mais, sans élimination préalable des fautes, on aurait obtenu les résultats suivants qui, de toute évidence, sont bien moins satisfaisants:

Résidus quadratiques moyens en altitude	
Sur les mesures laser	2,20 m
Sur les sommets statoscopes	1,75 m

Ecarts moyens quadratiques Sur les points de contrôle	1,75 m
pour un biais de	- 0,97 m

Un biais apparaît sur les points de contrôle, car toutes les fautes sont de même signe provenant de réflexions au-dessus du sol; c'est surtout cette dernière constatation qui rend le résultat peu acceptable.

On avait bien noté, qu'a posteriori, l'écart-type des mesures laser était de 1,80 m, et que l'écart-type des mesures statoscopes était de 1,20 m; il suffirait d'appliquer un biais d'environ un mètre à ces deux estimations pour expliquer les résultats qu'on vient de présenter.

On pourrait conclure que, dans l'état actuel des choses, les mesures de hauteur par laser, associées aux mesures d'altitude par statoscope, ne seront introduites efficacement dans les calculs des blocs d'aérotriangulation, que lorsque les conditions suivantes auront été remplies:

1. On aurait résolu les problèmes technologiques de la Synchronisation du déclenchement de l'obturateur de la chambre et du tir laser.

2. On aurait éliminé la nécessité du report du point d'impact du laser d'une photo 35 mm au cliché aérien 24X24cm.

3. On aurait mis au point une procédure, correcte du point de vue statistique, pour éliminer les fautes. On a vu plus loin ce que donne un estimateur robuste pour les mesures statos copes,et une méthode d'élimination des fautes pour les mesures laser.

4. On n'a pas encore abordé un point qui mérite d'être souligné: le point d'impact du tir laser se situait à environ 250 à 350 mètres en avant du centre du cliché ayant le même sommet, en sorte qu'il n'était vu, dans tous les cas, que sur le cliché lui-même et sur celui qui le suivait il n'était pas vu sur le cliché qui le précédait, on se trouvait ainsi privé d'un contrôle qui aurait été d'une grande efficacité, car garant d'une parfaite identification du point, l'avion avait donc volé **cabré**, sans doute sans le savoir, ce cabrage était compensé par la suspension de la chambre R.C.10, la direction du tir laser qui n'était par solidaire de cette suspension, comme cela serait souhaitable, n'était pas liée à l'axe optique de la chambre, était donc différente, dans le cas présent elle était en avant dans la direction de vol.

Rappelons que les mesures laser seules, c'est-à-dire non associées à des mesures statoscopes, n'auraient pas été en mesure d'améliorer l'altimétrie d'un bloc, les essais qu'on vient de décrire prouvent, par contre, qu'il y a un effet de synergie entre les mesures statoscope et les mesures laser.

10.5. CONCLUSIONS ET RESUME DES RESULTATS.

On a déjà donné au cours de cette étude les conditions à partir desquelles les essais pourraient être poursuivis.

De toutes les façons qu'on considère le problème, les mesures laser, même bien faites, bien enregistrées, et fiables intrinsèquement, ne pourraient exprimer leurs qualités qu'au-dessus des terrains nus, pas trop accidentés, la végétation, les constructions, la pente, sont autant d'obstacles à une bonne identification du point frappé par l'éclair laser; cette identification reste la clef de voûte, fragile, du système : Le défaut de la mesure laser sera toujours de s'attacher à n'importe quel point, or un point photogrammétrique correct qui serait un bon réflecteur laser ne sera <u>jamais</u> n'importe quel point, il doit posséder de nombreuses qualités, que le seul hasard ne saurait lui apporter.

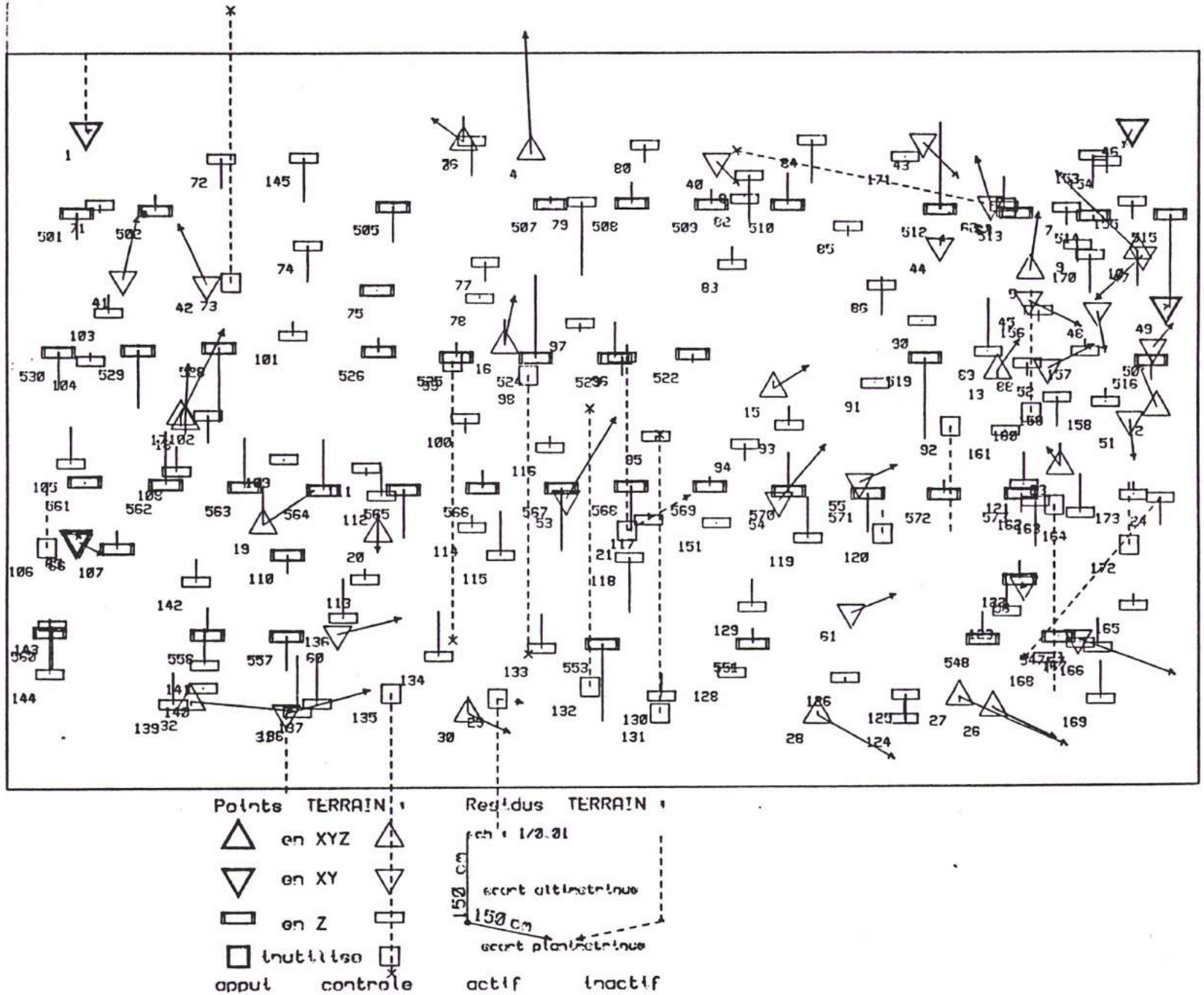
Quels que puissent être les progrès dans la technologie de la mesure, on se heurtera toujours à ce facteur limitant fondamental.On doit néanmoins signaler le bon comportement du laser associé au capteur de pression, rappelons brièvement les résultats de LA SOUTERRAINE:

Ecarts-types sur les points de vérification arrondis aux 5 cm les plus proches

Réseau complet d'appuis au sol	Appuis réduits et mesures aéroportées
X-Y = 0,70 Z = 0,45	Pas de contrôle 0,50

LA SOUTERRAINE

LASER ET STATOSCOPE



FR0523

ECHELLE 1:200000

Figure 14

11.UTILISATION DU SYSTEME DE POSITIONNEMENT GLOBAL POUR APPUYER LES BLOCS D'AEROTRIANGULATION

(GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

11.1.GENERALITES

le système de positionnement global (Traduction canadienne française de Global Positioning System ou G.P.S) est un moyen de navigation par satellites couvrant l'ensemble du globe. Il a été mis au point par le Ministère de la Défense des Etats-Unis pour ses besoins militaires. Il n'a donc aucune des caractéristiques que pourrait avoir un système civil poursuivant les mêmes objectifs.

Les différents signaux provenant d'une constellation de satellites NAVSTAR, (Navigation System with Time And Ranging), parviennent à un récepteur muet. Dans un système civil le récepteur serait, à la fois, émetteur et récepteur, et les satellites, qui seraient alors beaucoup plus simples, seraient des répondeurs.

Dans G.P.S les signaux émis par chacun des satellites permettent la mesure de la distance du récepteur au satellite à une constante inconnue près, qui est le décalage de l'origine de l'horloge du récepteur par rapport à celle du satellite, elle-même très légèrement désynchronisée par rapport au temps G.P.S. (Temps des U.S Naval Observatories qui intervient pour environ 1/4 des mesures dans le temps U.T.C).

Quatre mesures simultanées des distances biaisées du décalage d'horloge et appelées, pour cela, pseudo-distances à des satellites dont les positions sont connues, permettent de déterminer la position du récepteur dans les trois dimensions, plus le décalage de son horloge par rapport au temps G.P.S moyen des satellites observés. Il y a donc quatre inconnues à déterminer par sommet. Dans un système civil ces complications n'existeraient pas, mais l'émetteur-récepteur pourrait être entendu d'ennemis éventuels.

La précision de la mesure d'une pseudo-distance est de l'ordre de 2 à 3 métres en écart-type. Ce qui est insuffisant pour les besoins de la Géodésie de précision.

Pour permettre d'estimer correctement les effets de la réfraction sur la mesure des pseudo-distances les satellites émettent sur deux fréquences qui, toutes deux, sont porteuses de signaux permettant de calculer la position du

récepteur mais seule l'une d'entre elles est accessible aux civils. Les modulations des fréquences, porteuses des messages concernant les éléments permettant de calculer la position du satellite émetteur, et les tops permettant de calculer les pseudo-distances, ne comportent que des signaux binaires (0 et 1) qui sont émis à la cadence de 50 bits par seconde.

Les tops permettant de calculer les pseudo-distances sont des series de bits pseudo-aléatoires composés à l'aide de registres glissants. Ils présentent une bande très étroite de corrélation, en sorte qu'on peut arrêter très précisemment le temps d'arrivée du signal, qui est ensuite transformé en pseudo-distance.

On peut mesurer de façon encore plus précise les changements de distances entre le satellite et le récepteur en mesurant la fréquence de l'onde porteuse des codes, qui est affectée des effets de déplacements relatifs du satellite et du récepteur par effet DOPPLER-FIZEAU. Cet effet est proportionnel a la vitesse relative de ces déplacements. Le récepteur mélange la porteuse à une fréquence de référence connue et compte les battements entre la fréquence reçue inconnue, puisqu'elle est affectée par l'effet DOPPLER, et une fréquence de référence connue.

Par ailleurs il est facile de mesurer, en chaque point de réception, la phase de la porteuse. On dispose donc de tous les éléments nécessaires pour calculer avec une très grande précision la différence de distance entre le satellite et le récepteur, sur deux sommets successifs, pour autant que la réception ne soit pas interrompue.

La précision obtenue en mesurant les pseudo-distances seules serait insuffisante pour les besoins de la photogrammétrie aérienne aux moyennes et grandes échelles, on le verra en ANNEXE VI C, même si on prenait la précaution de disposer d'un récepteur fixe sur le chantier photographié synchronisé avec le récepteur porté par l'avion, le récepteur fixe transmettrait, en temps réel ou en différé, les corrections à apporter aux pseudo-distances pour tenir compte des variations des effets de la réfraction et de la mise à jour des éléments de calcul des positions des satellites.

Le récepteur fixe ne pourrait fournir des indications valables que s'il n'était pas trop éloigné du récepteur mobile.

On admet que le coefficient de corrélation est du type:

$$\exp - (l/l_o)$$

l étant la distance comprise entre le récepteur fixe et le récepteur mobile et l_o une distance caractéristique qu'on se gardera bien de fixer en l'état actuel de l'expérimentation dans ce domaine, qui est, jusqu'ici, limitée à quelques essais au sol.

Lorsque la distance l est très courte les corrections sur les pseudo-distances seront telles qu'on peut espérer un précision de 5 métres en écart-type sur la position du point inconnu.

Une plus grande précision peut être obtenue lors-

qu'on ne cherche pas à obtenir des résultats en temps réel, c'est-à-dire lorsqu'il est possible de retraiter les observations en différé.

Il devient alors possible de filtrer en temps réel les résultats obtenus exclusivement par les pseudo-distances à l'aide des mesures DOPPLER, puis de les lisser par un calcul en retour différé.

Il est aussi possible, et cela a été envisagé, de mettre en oeuvre les mesures d'une centrale de navigation par inertie; certains ont pensé, dès 1985, se passer, par ce moyen, de tout appui au sol.

D'autres ont aussi pensé utiliser un récepteur G.P.S et une centrale de navigation par inertie pour combler les interruptions de réception de G.P.S qui retirent tous les avantages qu'on peut tirer du filtrage et du lissage des pseudo-distances par la phase et le comptage DOPPLER, ceci par ce que les défauts des deux systèmes de navigation ne sont pas corrélés:

- Dérives pour les centrales de navigation par inertie.
- Pertes de réception pour G.P.S, qui peut corriger les dérives de la centrale, alors que cette dernière serait en mesure de combler les interruption de la première.

En combinant tous ces moyens on prévoyait déjà, en 1985, par des simulation :

Pour une précision de 12m sur un point isolé.

5 m sur la position d'un point avec deux récepteurs.

0,50m pour une combinaison de G.P.S différentiel avec les pseudo-distances lissées par la phase et une centrale de navigation à inertie,

Ceci indépendamment de toute mesure photogrammétrique.

11.2.MATERIEL UTILISE

Pour chaque opération l'I.G.N avait utilisé un récepteur TR5-S B construit par la SERCEL, ce matériel avait fait l'objet d'une description complète lors d'une présentation à la Commission I du Symposium de l'ISPR de Stuttgart en 1986 [41 BROSSIER & al].

Cet équipement comprenait : L'antenne de réception, différente entre les essais sur avion lent et sur avion rapide, et son préamplificateur, une unité de réception et de traitement, un écran de visualisation, et un clavier de commande.

Cet appareil, encore expérimental à cette époque, pouvait recevoir et traiter simultanémment les signaux de cinq satellites NAVSTAR en code C/A sur la fréquence L1; il était conçu pour réaliser une mesure précise de la phase et des pseudo-distances dans cinq canaux séparés, à la cadence d'une mesure toutes les 0,6 seconde.

OBSERVATOIRE DE PARIS

Le TR5-S B était équipé d'un processeur interne pour le calcul en temps réel d'une solution complète 3D+T, en utilisant les pseudo-distances lissées par la phase. Lorsque le nombre n de satellites susceptibles d'être reçus correctement devenait insuffisant, n<4, il calculait, pour n=3 par exemple, une solution 2D+T, c'est-à-dire les coordonnées horizontales et le temps, qu'il était possible d'associer à des mesures statoscope : Voir les simulations en configuration dégradée et les chantiers d'ALBERVILLE et de MANOSQUE dans le chapitre suivant

La conception de l'antenne avait fait l'objet d'un soin particulier, d'abord pour s'adapter aux impératifs de sa fixation sur le fuselage de l'avion, puis pour obtenir un retard et une position du centre de phase indépendants de la direction considérée sur l'hémisphère supérieur, et pour éviter les réflexions parasites provoquant des erreurs dites de" trajets multiples".

C'était en partant de la version statique de son récepteur, mis au point pour les besoins de la Géodésie, que la SERCEL en avait étendu le domaine d'application du TR5-S au positionnement dynamique en mer, puis sur avion lent, en utilisant la même antenne, au cours des essais d'AMIENS qui seront rapportés ici.

L'essentiel des modifications du matériel avait porté sur la mise au point d'antennes adaptées à la vitesse du mobile, et sur les logiciels correspondants.

Pour le traitement des données, les améliorations avaient porté sur l'intégration de la phase et son utilisation avec les pseudo-distances .

L'objectif visé était de prendre en compte les déplacements du véhicule porteur avec une précision décimètrique en se limitant, pour les deux premiers essais, à une vitesse de 200 noeuds et 1g d'accélération.

Ces premiers essais, ceux d'AMIENS, avaient été effectués sur un avion lent AEROCOMMANDER, seul capable de recevoir l'antenne qui avait été développée, auparavant, pour les applications maritimes.

Les résultats encourageants obtenus avaient montré l'interêt qu'il y avait d'étendre les possibilités du récepteur à de plus grandes vitesses de déplacement, lui ouvrant de larges possibilités d'application en cartographie. L'année suivante (1987), pour les essais effectués sur biréacteur Mystère 20, il a été utilisé une antenne multidirectionnelle DORNE-MARGOLIN, de forme hémisphèrique, dont l'aérodynamique était compatible avec la vitesse de 350 noeuds. On en trouvera la description dans [42 BROSSIER MILLION REYNES].

11.3. LES MESURES.[18 BONIN]

11.3.1.PSEUDO-DISTANCES

Les mesures des pseudo-distances sont effectuées à partir d'un compteur général et par un vernier indépendant sur chaque canal(il y a un canal par satellite reçu, soit cinq canaux):

On mesure les "poids forts" des pseudo-distances de 100ns à 10 ns; le vernier permet, sur huit bits, de mesurer les "poids faibles" de 100/256 soit 0.39ns à 100ns (soit, environ de 0.12 à

OBSERVATOIRE ★ BIBLIOTHÈQUE DE MEUDON

30m).

Le principe de la mesure est le suivant:

On a trois compteurs à 10Mhz

Un compteur général qui compte modulo 10 sec

Un compteur de base par canal (5) compte les 100ns rondes (N2 x 30m).

Un vernier analogique de 256 X 10 Mhz compte les 1/256ème de 100ns (N3 x 0,12m).

La limite de résolution est donc de $300.10^6 / 256.10^7 =$ 0,12m, sur les pseudo-distances.

La mesure est:

$(N_1 - N_2 - N_3/256)$ ns

11.3.2. MESURE DOPPLER.

La mesure Doppler s'éffectue indépendemment sur chaque canal.

Une fréquence de transposition qui absorbe l'écart entre la fréquence DOPPLER de la porteuse est numérisée sur un compteur 16 bits ce qui représente N tours de phase à 40Khz.

La période de ce signal est mesurée en permanence à l'aide d'un deuxième compteur et d'une horloge 5Mhz.

On arrête le deuxième compteur de 8bits qui représente le nombre P de fractions de de 40Khz dans 5Mhz.

Enfin un troisième compteur numérise en permanence f le nombre de fractions de 5Mhz dans 40Khz.

La mesure est donc:

(N + P/f) cycles

La cadence des mesures disponibles est 0,60 sec c'est-à-dire tous les 30 "bits-datas".

11.4. MODELES FONCTIONNELS ET STOCHASTIQUES DES MESURES.

Les problèmes de la définition et du calcul de la précision des réseaux d'appui combinés dans lesquels interviennent des mesures terrestres et des mesures faites sur des satellites ont été largement traités par les auteurs: Il impose l'adoption d'un modèle hybride fonctionnel et stochastique tenant compte de l'influence de causes extérieures et de la précision interne des mesures.

Dans le cas présent, comme pour les autres mesures ,le modèle stochastique se trouvait imposé, en introduisant des poids appropriés aux mesures, sous une forme scalaire, ce qui laissait peu de choix pour le modèle fonctionnel permettant de passer d'une catégorie de mesures à l'autre.

Il ne semble pas que des modèles physiques complets, même pour les mesures des appareils immobiles au sol, aient été vraiment décrits. On doit toutefois signaler une allusion faite

par [43 BEUTLER 1986.][3] qui pensait que le coefficient d'échelle μ était influencé par les erreurs commises sur le parcours ionosphérique des signaux et, par conséquent, par la densité électronique dans l'ionosphère; il reliait, par une formule très simple, l'erreur d'échelle μ à la densité électronique dans l'ionosphère.

Il est bien certain que le modèle doit dépendre de phénomènes physiques autres que ceux provenant du récepteur et des éphémérides diffusées par les satellites, tels que les erreurs globales de réfraction sur le trajet satellite-récepteur qui déplacent, tournent les axes du système de référence et changent l'échelle du réseau formé par les sommets mesurés dans des directions tout à fait quelconques, même si ces effets sont en partie compensés par la connaissance des valeurs connues en quelques points géodésiques, il faudrait trop de points d'appui pour reconstituer correctement les trajectoires exactes des satellites observés et toutes les erreurs de réfraction sur l'ensemble du parcours pendant toute la durée du vol et sur toute la surface observée.

La connaissance des termes de covariance externe ne donne pas une image réelle de la précision interne obtenue, qui ne pourrait être atteinte qu'en affinant le modèle fonctionnel.

On n'a pas de modèle physique incontestable à proposer, sinon celui à douze (12) paramètres qui permettrait de connaitre tous les éléments de calcul d'une rotation, plus une translation, plus un tenseur de déformation pour l'ensemble du chantier, alors que ces éléments pourraient, aussi, varier dans le temps et dans l'espace, si le chantier était assez grand.

Suivant le nombre des appuis disponibles on pourrait toujours approcher un modèle annulant les résidus sur tous les points d'appui, on trouverait, alors, que la précision interne est très grande, et de l'ordre du pouvoir de résolution des appareils de mesure, comme c'est trop souvent le cas dans certaines publications.

Inversement, si on choisissait un modèle peu élaboré, la variance trouvée comporterait une partie de sa valeur qui ne serait dûe qu'aux défauts du modèle. Par exemple, si on n'a besoin que de peu de points d'appui pour définir le modèle et qu'on les introduise tous dans l'ajustement, les résidus d'ajustement porteront, en partie seulement, la trace de ces défauts du modèle. Si, à l'inverse, on garde de nombreux points en contrôle pour vérifier, à la fois, l'ajustement et le modèle, les écarts constatés sur les points de contrôle seront, non seulement plus importants, mais biaisés d'un écart moyen arithmétique qui reflètera, aussi, mais complètement, les défauts du modèle.

• On pourrait se donner," a priori", un modèle physique qui réponde à deux conditions évidentes puisque les deux réseaux, terrestre et satellitaire, ne sont pas libres :
ils sont contraints par:

1°/ L'orientation des angles zénithaux, pour l'un la normale au géoïde, pour l'autre la normale à l'ellipsoïde : On

---

[3] Comparison between Terrameter and G.P.S Results-and how to get there.Proceedings of C.A.S.CERN;GENEVA.]

verra que la précision des points d'appui et le fait que les bandes de vol soient presque rectilignes ne permettent pas toujours de déterminer les paramétres de ces transformations pourtant physiquement présentes.

2°/ L'échelle des distances qui n'est pas la même; seulement, souvent , la différence est, aussi, négligeable, ou inappréciable avec les moyens d'appui dont on dispose. Cette échelle peut être également fonction de la direction considérée (direction des satellites utilisés).

11.4.1. MODELE DE GAUSS-MARKOV.

Les auteurs décrivent, généralement, deux modèles dont le premier et le plus simple est appelé modèle de GAUSS-MARKOV.

Dans ce modèle les coordonnées fournies par les mesures faites à partir des satellites sont considérées, faussement d'ailleurs, comme des observations alors qu'elles résultent d'une compensation interne séparée, comme le sont, d'ailleurs, les mesures terrestres:

$$I.x = l_T + V_T \qquad p_T = C_T^{-1}$$
$$I.x = l_S + V_S \qquad p_S = C_S^{-1}$$

La matrice de covariance sera:

$$C = I\,.(p_T + p_S)^{-1}$$

Les poids des coordonnées terrestres et satellites sont simplement additionnés.

L'interaction mutuelle entre les deux catégories de mesures dépendra de l'importance de la précision relative et de la nature des deux catégories de mesures associées.

11.4.2. MODELE DIT DE GAUSS- HELMERT.

Les deux ensembles de coordonnées, satellitaires et terrestres sont considérés comme des observations à l'intérieur d'un système d'équations de conditions avec des inconnues qui sont les paramètres p du modèle choisi ou retenu: pour le cas présent une similitude dans l'espace $\mathbb{R}^3$, le système d'équations est alors:

$$x_T + v_T - (x_S + v_S) + G.p = 0$$

$$B.v + G.p + r = 0$$

$$B = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & \ldots\ldots\ldots\ldots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & \end{vmatrix}$$

$$G = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & X & 0 & Z & -Y \\ 0 & 1 & 0 & Y & -Z & 0 & X \\ 0 & 0 & 1 & Z & Y & -X & 0 \end{vmatrix}$$

$$r = \begin{vmatrix} rx \\ ry \\ rz \end{vmatrix}$$

$$p = \begin{vmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \\ \mu \\ \alpha \\ \beta \\ \Gamma \end{vmatrix}$$ Paramétres de similitude

Pour un modèle à douze paramètres on aurait:

$$p = \begin{vmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \\ \mu 1 \\ \mu 2 \\ \mu 3 \\ \\ i1 \\ i2 \\ i3 \\ \alpha \\ \beta \\ \Gamma \end{vmatrix}$$

Trois paramètres d'échelle

Trois paramètres d'orientation des axes principaux des paramètres d'échelle

Pour les inconnues définitives ayant un sens géométrique précis et :

$$p = (Tx \;\; Ty \;\; Tz \;\; a \;\; b \;\; c \;\; d \;\; e \;\; f \;\; g \;\; h \;\; i \;\;)^T$$

pour les inconnues réellement calculées avec:

$$G^T.G = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & X & Y & Z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z \\ X & 0 & 0 & X^2 & X.Y & X.Z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y & 0 & 0 & X.Y & Y^2 & Y.Z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z & 0 & 0 & X.Z & Y.Z & Z^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & X^2 & X.Y & X.Z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y & 0 & \multicolumn{9}{l}{.....etc} \end{vmatrix}$$

ou, après élimination des inconnues de translation:

$$G^T.G = \begin{vmatrix} I_g & 0 & 0 \\ 0 & I_g & 0 \\ 0 & 0 & I_g \end{vmatrix}$$

Chaque terme noté Ig étant un tenseur d'inertie 3X3

Les termes de translation sont identiques dans les deux cas et l'axiateur [44 RINNER] sera:

$$\hat{A} = \begin{vmatrix} 0 & (d-b)/2 & (g-c)/2 \\ (b-d)/2 & 0 & (h-f)/2 \\ (c-g)/2 & (f-h)/2 & 0 \end{vmatrix}$$

On identifie facilement les valeurs de α, β ,et Γ

et le tenseur de déformation sera:

$$D = \begin{vmatrix} a & (b+d)/2 & (c+g)/2 \\ (b+d)/2 & e & (f+h)/2 \\ (c+g)/2 & (h+f)/2 & i \end{vmatrix}$$

Dont on peut calculer les valeurs propres $\mu 1$, $\mu 2$ et $\mu 3$ qui sont les trois coefficients d'échelle dont l'orientation est quelconque et définie par i1, i2 ,et i3 qui sont les paramètres d'orientation des axes orthogonaux des échelles μi

on remarque que:

$$\hat{A} + D = \begin{vmatrix} a & d & g \\ b & e & h \\ c & f & i \end{vmatrix}$$

La transformation de HELMERT n'étant qu'une simplification de celle qu'on vient de présenter, qui reflète sans doute mieux une réalité qu'on ne pourra pas atteindre, d'ailleurs.

En reprenant les notations de [45 M.C.BOUCHER].

$$\begin{vmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{vmatrix} + (1 + d\mu).R \begin{vmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{vmatrix}$$

Si les conditions suivantes sont remplies:

1°/ Les deux systèmes sont proches, c'est-à-dire si Tx,Ty, et Tz n'excèdent pas quelques centaines de mètres.

2°/ $d\mu$ n'excède pas 10^{-6}

3°/ R est une matrice de rotation dont les éléments n'excèdent pas quelques secondes d'arc, il est possible d'écrire, au premier ordre près:

$$R = \begin{vmatrix} 1 & -\Gamma & \beta \\ \Gamma & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{vmatrix}$$

$\alpha = (f-h)/2$
$\beta = (c-g)/2$
$\Gamma = (b-d)/2$ de l'axiateur
Sinon au deuxième ordre près on aurait:

$$R \equiv \begin{vmatrix} 1-\beta^2/2-\Gamma^2/2 & -\Gamma+\alpha.\beta & -\alpha.\Gamma+\beta \\ \Gamma & 1-\alpha^2/2-\Gamma^2/2 & \beta.\Gamma-\alpha \\ -\beta & \alpha & 1-\alpha^2/2-\beta^2/2 \end{vmatrix}$$

La valeur exacte de R étant donnée par la matrice de RODRIGUES.[Voir ANNEXE II]

Or, d'après toutes les publications, les paramètres de rotation seraient très petits, le système serait, alors, linéaire.

On aurait, pour une seule mesure:

$$G^T.G = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & X & 0 & Z & -Y \\ 0 & 1 & 0 & Y & -Z & 0 & X \\ 0 & 0 & 1 & Z & Y & -X & 0 \\ X & Y & Z & X^2+Y^2+Z^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Z & Y & 0 & Y^2+Z^2 & -X.Y & -X.Z \\ Z & 0 & -X & 0 & -X.Y & X^2+Z^2 & 0 \\ -Y & X & 0 & 0 & -X.Z & 0 & Y^2+Z^2 \end{vmatrix}$$

Il suffirait de faire la somme de chacun de ces termes pour les n différents points en cause:

$\sum_{i=1}^{i=n}$ sera remplacé, dans ce qui suit par Σ

On remarque que le système se simplifie si on prend pour origine des coordonnées le centre de gravité des n points, on a alors:

$$\sum_{i=1}^{i=n} X_i = 0 \qquad \sum_{i=1}^{i=n} Y_i = 0 \qquad \sum_{i=1}^{i=n} Z_i = 0$$

La matrice globale devient:

$$G^T.G = \begin{vmatrix} n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Sigma R^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Sigma(X^2+Y^2) & -\Sigma(X.Y) & -\Sigma(X.Z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Sigma(X.Y) & \Sigma(X^2+Z^2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Sigma(X.Z) & 0 & \Sigma(X^2+Y^2) \end{vmatrix}$$

Avec $\Sigma R^2 = \Sigma(X^2+Y^2+Z^2)$

et comme second membre:

$$G^T.r = \begin{vmatrix} \Sigma rx \\ \Sigma ry \\ \Sigma rz \\ \Sigma(X.rx + Y.ry + Z.rz) \\ \Sigma(- Z.ry + Y.rz) \\ \Sigma(Z.rx + X.rz) \\ \Sigma(-Y.rx + X.ry) \end{vmatrix}$$

On a alors immédiatement sans calculs compliqués:

$Tx=\Sigma rx/n$

$Ty=\Sigma ry/n$

$Tz=\Sigma rz/n$

$$1 + d\mu = \frac{\Sigma(X.rx + Y.ry + Z.rz)}{\Sigma(X^2 + Y^2 + Z^2)}$$

etc.....

Enfin on peut faire un calcul d'erreur simplifié en remarquant que si les coordonnées sont rapportées au centre de gravité des sommets perspectifs et que si l'avion vole à altitude constante, comme c'est le cas en photogrammétrie aérienne, on a:

$Z \approx 0$ d'où:

$$\Gamma = \frac{\Sigma(-Y.rx + X.ry)}{\Sigma(X^2 + Y^2)}$$ et si on considère que:

$\sigma = \sigma x = \sigma y = \sigma z$ on aura:

$\sigma^2\Gamma = \sigma^2/\Sigma(X^2 + Y^2)$ et ,

$\sigma^2\mu = \sigma^2/\Sigma(X^2 + Y^2 + Z^2)$

etc.....

En tenant compte de la précision avec laquelle sont connus et identifiés les points d'appui naturels à l'échelle de prise de vue du 1/30.000ème, soit σ = 0,50m, de la dimension moyenne des blocs utilisés pour les essais, soit 50 X 30Km, on aurait par mesure à un point d'appui redondant:

$\sigma\alpha$ = 10" Seulement si la réception était continue
$\sigma\beta$ = 7" tout au long du bloc
$\sigma\Gamma$ = 5"
$\sigma\mu = 4.10^{-5}$ et
$\sigma T = \sigma$;

σT étant l'écart-type sur les paramètres de translation soit 0,50m aux échelles qu'on a utilisées; l'augmentation de la précision se ferait comme $\sigma i/\sqrt{(n-i)}$; pour aboutir à une précision de l'ordre de la seconde sur α il faudrait au moins que n-i = 100 soit n = 107 soit, encore et par exemple, 32 points connus dans leurs trois coordonnées et un point connu en altimétrie. A noter que BEUTLER [43], cité plus haut, dans ses expériences au CERN donne les valeurs suivantes des rotations des mesures G.P.S faites pour les amener dans le référentiel du terrain:

α = 0,52"+-0,08"
β = 0,25"+-0,08"
Γ = 0,75"+-0,05"
$\mu = 1,3.10^{-6} +-0,3.10^{-6}$

Il faudrait donc multipler les points d'appui pour obtenir une précision compatible avec les quantités inconnues cherchées et dont les valeurs physiques sont connues dans la littérature spécialisée pour des essais faits à poste fixe au sol; or si on disposait d'autant de points d'appui au sol, dans un tel bloc, on pourrait largement se passer des mesures G.P.S.!

Cette simple constatation et le fait expérimental que les valeurs trouvées dans une transformation de similitude n'avaient aucune cohérence entre les différentes bandes en raison des pertes de réception en fin de bande, nous ont amené à simplifier le modèle en ne conservant que les trois translations T_x,T_y et T_z.

Enfin les interruptions de réception en fin de bande interdisaient toute détermination précise de α, qui, de plus, serait indéterminé si la bande était rectiligne !

11.4.3. LES ESSAIS DES MODELES DES MESURES DES POSITIONS DES SOMMETS PAR G.P.S.

En se rapportant aux nombreuses publications sur le sujet [45 KEEGAN 19 SHWARZ 20 FRIESS 46 HARTL 47 MADER 48 BAKER] on a choisi de vérifier ce que donnerait une simple transformation de similitude dans l'espace $\mathbb{R}^3$ à sept paramètres. Une telle transformation n'est pas linéaire, dans le cas général, mais dans le cas présent les quatre paramètres inconnus de rotation et d'échelle étant nécessairement petits, sinon très petits, [49 KRAKIWSKY 50 BOUCHER 51 WELSH] le système serait linéaire.

En fait on a voulu procéder en trois temps:

1°/ Calcul de T_x,T_y et T_z par bandes, on rapporte le bloc à son centre de gravité.

2°/ Détermination de α,β,Γ et μ par bande.

3°/ Traitement des résidus en fonction du temps auquel le sommet a été observé.

Le traitement 2° n'a pas donné de valeurs physiquement plausibles et 3° n'a rien donné qui puisse être considéré comme une tendance stable.

En effet on savait déjà, qu'il était possible, préférable, et plus précis de résoudre les problèmes de ce type en, au moins, deux temps, c'est-à-dire, en déterminant d'abord les inconnues de translation, avant d'entrer dans des calculs plus délicats, puis les inconnues d'échelle et de rotation [52 MILLION]: cette manière d'aborder le problème nous avait évité des complications inutiles; en effet la détermination préalable des trois inconnues de translation ne laissait subsister qu'un système d'équations dont la résolution ne donnait que des valeurs de l'échelle et des rotations telles,qu'on avait aucune certitude que ces déterminations aient un sens physique.

Les résidus étaient, de plus, de l'ordre de grandeur de la troncature faite arbitrairement par le constructeur du récepteur, et de l'ordre de grandeur de la précision attendue. Il était donc sans intérêt, face à cet état de fait, de compliquer inutilement le modèle, ces complications étant connues pour entraîner des difficultés dans la résolution des systèmes comportant un très grand nombre d'inconnues.

On avait ensuite envisagé de tenir compte d'une variation des paramètres dans le temps en créant des inconnues multipliant des termes du premier et éventuellement du second degré du temps t et t^2; mais:

- d'une part, l'examen des variations des résidus dans le temps, en particulier sur une heure [53 KLEUSBERG], laissait à penser que cela était, soit insuffisant, soit inutile.

- d'autre part, sur les vols d'Amiens 1 et 2, dont une publication faisait la description [41 BROSSIER & al], il avait été observé des pertes de réception, lorsque l'avion faisait demi-tour pour reprendre une autre ligne de vol. Ces pertes de réception affectaient les satellites masqués par l'aile de l'avion quand ce dernier s'inclinait dans le virage lui permettant de changer de ligne de vol. Ce phénomène avait été confirmé à LUNEL et à VICHY, on avait donc estimé que, dans la mesure où les paramètres de translation étaient calculés par bande, il n'était plus nécessaire de tenir compte, dans l'instant, de leur dérive éventuelle pendant le court laps de temps de la prise de vue d'une seule bande, qui était de l'ordre de grandeur de cinq minutes.

- Enfin, on trouvait, par cet artifice, un moyen particulièrement simple de traîter le problème du décalage qui existe entre l'antenne de réception G.P.S et la chambre de prise de vue, que des auteurs avaient résolu de façon assez laborieuse.

Il restait, toutefois, possible qu'on se soit trouvé, à AMIENS en 1986, devant des circonstances assez favorables uniquement pour ce qui concerne les mesures G.P.S, qui ne permettaient, ni de déterminer les dérives des paramètres dans le temps, ni les rotations, ni les effets d'échelle, et qui ne se rencontreraient que rarement; pourtant l'année suivante, en 1987, on pouvait faire les mêmes observations, et arriver aux mêmes conclusions.

Depuis (1988) on a pu avoir communication des publications qui seraient faites ou qui ont été faites, sur le même sujet au Congrès I.S.P.R. de KYOTO au mois de Juillet [54 FRIESS 55 LUCAS]. Il semblerait que ces auteurs aient pu déterminer les valeurs de dérives des paramètres de translation [54 FRIESS] dans le temps de l'ordre de 1' à 6 m/m par seconde. En raison de la précision très différente des appuis au sol entre les essais qu'on a exploités et ceux décrits dans ces publications, dans notre cas c'étaient des points naturels anciens, et des marques peintes il y a fort longtemps et repeintes depuis, dans le cas des auteurs cités c'étaient des points fraîchement signalés par des balises, en assez grand nombre, il était donc fort possible qu'une dérive, de l'ordre du m/m par seconde, ait pu nous échapper, pour se trouver mêlée aux divers biais inconnus; par contre, il paraissait peu probable qu'une dérive de 6m/m par seconde ait pu passer inaperçue, car, sur une bande de vol d'une durée de 5 minutes, la différence de translation sur une coordonnée, entre le début et la fin de la bande, aurait été de

1,80m.

Après des essais infructueux effectués sur AMIENS 2, en utilisant les coordonnées directement calculées et enregistrées par le récepteur, le fabricant de l'appareil de réception (SERCEL) avait modifié son logiciel de traitement des signaux reçus, les données G.P.S. avaient été recalculées en temps différé à partir des données source c'est-à-dire les signaux originaux et non les résultats des calculs du récepteur en temps réél. Ce retraitement permettait de connaître ce qu'aurait calculé le récepteur en vol s'il avait été équipé du logiciel rectifié.

La modification concernait, aussi, les pertes momentanées de réception dûes au masquage de satellites en virage. Dans le logiciel précédent il en résultait des décalages de position lents à se résorber, qu'on modélisait, sans commune mesure avec ce qui pouvait être attendu. En tout état de cause, il ne semble pas, pour l'instant, que les résultats des rattrapages des "cycles perdus" soient satisfaisants.

Les données retraitées avaient fourni des résultats plus proches de la réalité. Sur la durée de prise de vue d'une bande (quelques minutes, car l'avion parcourt environ 10km par minute) on avait :

$$X_{TERRAIN} = X_{GPS} + T_{XBANDE}$$

le paramètre temps pouvait très bien ne pas être pris en compte, pourvu que la durée de prise de vue d'une bande ne soit pas trop longue.

Fixer les paramètres de translation par bande présente également un autre avantage important, allant au delà de celui de traiter partiellement les dérives de ces paramètres de translation ou de similitude dans le temps, c'est de traiter, de façon simple, mais pourtant efficace, le problème extrèmement gênant, de l'excentricité de l'antenne de réception de G.P.S par rapport à la chambre de prise de vues.

Pour le traiter correctement il faudrait connaitre l'attitude de l'appareil (l'avion) par rapport aux axes de la chambre de prise de vues, c'est-à-dire les angles de dérive, lesquels sont corrigés par bande, sur la monture de la chambre pour éviter que les photographies ne soient prises en épis, les angles de cabrage et d'inclinaison sur l'horizon qui sont inconnus parce que corrigés automatiquement par la suspension de la chambre dont l'axe de prise de vue est presque vertical, l'angle de cabrage pourrait être relevé; évidemment c'est ce "presque" qui fait toute la difficulté. En effet l'orientation du vecteur antenne-chambre est lié au corps de l'avion alors que la matrice de rotation, qui est déterminée dans le calcul, permet de passer des repères de fond de chambre et de l'axe optique de la chambre (le système de référence du cliché) aux axes du système de référence des points connus au sol (terrain).

Le problème serait résolu si on prenait la précaution d'enregistrer les paramètres d'attitude de la chambre par rapport aux axes du corps de l'avion, auxquels sont rapportés les mesures

des composantes du vecteur chambre-antenne.

Il sera évidemment possible, dans l'avenir, de noter ces angles ou de les enregistrer. Pour les expériences présentées on les a ignorés, en confondant, dans les calculs visant à déterminer les paramètres de translation de l'ensemble des chantiers, la matrice de rotation de la chambre avec la matrice de rotation du vecteur antenne-chambre, lorsque celà était nécessaire. Mais, pratiquement dans le programme FAISCEAUX modifié, en fixant les paramètres de translation par bande, il n'était, ainsi, plus nécessaire d'en tenir compte dans les applications; le paramètre de translation inconnu à déterminer dans la compensation étant la somme du paramètre réel, le biais de la mesure G.P.S Tx(y ou z), et de la composante du vecteur antenne-chambre selon l'axe considéré vx(y ou z). La seule hypothèse faite était que l'orientation de ce vecteur restait invariable tout au long de la bande, ceci était exact pour l'angle de dérive qui était fixé une fois pour toutes au début de la bande, mais moins certain pour le cabrage et l'inclinaison sur l'horizon qui ne sont pas contraints par un réglage fixe mais libres de varier en fonction du vol.

Le choix d'un paramètre de translation par bande avait donc l'avantage d'intégrer simplement, dans le calcul, le vecteur chambre-antenne G.P.S.:

- dans le plan horizontal dans Tx + vx dans un sens et Tx - vx dans les bandes adjacentes.
- En altimétrie le vecteur vz se trouve mêlé à la hauteur du géoïde sur l'ellipsoïde de référence et à la correction de translation Tz, la correction pouvait, ainsi, être faite globalement.

Bien entendu,par cet artifice, la pente du géoïde était négligée.

La hauteur du géoïde était de l'ordre du décimétre, donc inappréciable à Amiens, mais, au contraire, pas du tout négligeable à LUNEL (6,72 m à 6,80 m) et à VICHY (4,90 m), où, en outre, la composante altimétrique mesurée du vecteur chambre-antenne vz était égale à 1,65m.

Des modèles plus compliqués pourraient être essayés quand les technologies de réception et de traitement auront fait l'objet d'une mise au point plus poussée.

Afin de connaître les paramétres de translation, en valeurs absolues des mesures G.P.S., des coordonnées des sommets perspectifs débarassées du vecteur v antenne-chambre (résultats en ANNEXE V), on a tenu compte, dans certains calculs, de cet écart, en ajoutant aux coordonnées G.P.S.la valeur:

$$D\,X = R.v \quad \text{soit:}$$

$$\begin{vmatrix} DX \\ DY \\ DZ \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r31 & r32 & r33 \end{vmatrix} . \begin{vmatrix} vx \\ vy \\ vz \end{vmatrix}$$

Evidemment on négligeait l'angle de dérive du vol, LUCAS [54] propose d'en tenir compte en introduisant,dans la résolution générale, trois nouvelles inconnues par bande, l'angle de dérive, de cabrage, et de roulis de l'avion, pour la bande D, sous la forme d'une matrice de rotation prémultipliant la matrice R de chaque sommet, qu'on pourrait limiter à l'angle de dérive:

$$D = \begin{vmatrix} d11 & d12 & 0 \\ d21 & d22 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \text{ou} \quad D = \begin{vmatrix} d11 & d12 & d13 \\ d21 & d22 & d23 \\ d31 & d32 & d33 \end{vmatrix}$$

..si on veut être rigoureux à n'importe quel prix.

Il nous avait semblé que le fait de créer une inconnue de translation par bande était suffisant, pour l'instant; en outre, il restait possible que l'auteur cité risque d'introduire une inconnue qu'il serait bien facile de mesurer: l'angle de dérive pourrait être relevé à bord de l'appareil, et dans ce cas toutes ces complications n'ont d'intérêt qu'en cours de recherche, elles n'auraient plus leur place dans une exploitation normale.

Un autre problème se posait: celui de la variabilité dans le temps des paramètres de la similitude, mais aussi celui de la pente du géoïde qu'on a négligée, qu'on pourrait lier à la dérive des paramètres de translation, puisque le temps et les distances parcourues par l'avion sont très corrélés, la vitesse de déplacement étant très régulière, ainsi que la cadence des prises de vues.

Finalement, faute de trouver des dérives dans le temps bien nettes, on n'en a pas tenu compte, et, par conséquent, on a négligé la pente du géoïde, laquelle, d'ailleurs, n'était sensible qu'à LUNEL.

Par compte on a fixé des translations par bandes non seulement en raison des pertes de réception dans les virages mais aussi pour pouvoir traiter des blocs observés à des jours différents ou en changeant de constellation de satellites au cours du même vol. Dans ces conditions, les variations des paramètres de translation pendant la durée de la prise de vue d'une bande pouvaient être considérées comme négligeables, compte tenu de la précision des points d'appui. Sur des points d'appui balisés ce ne serait sans doute plus le cas, et il faudrait, peut-être, en tenir compte. De la même manière on pourrait traiter la pente du géoïde en admettant une dérive de Tz en fonction du temps qui serait proportionnelle à la distance puisque l'avion vole à vitesse sensiblement constante.

La dérive dans le temps des paramètres de translation des coordonnées des sommets perspectifs données par G.P.S. pourrait être très simplement prise en compte, surtout lorsque la G.D.O.P. est élevée, ou lorsqu'elle varie rapidement, en complétant, comme suit, la relation proposée plus haut:

$$X_{TERRAIN} = X_{GPS} + TX_{BANDE} + d(TX_{BANDE})/dt.t$$

t étant le temps G.P.S. rapporté, par exemple, au centre de la bande par:

$$t_i \leftarrow\!\!- t_i - \sum_{i=1}^{i=n} t_i / n$$

, i étant le numéro du sommet et n le

nombre total de sommets de la bande et t_i le temps G.P.S. donné par le récepteur. d(TXBANDE)/dt serait une nouvelle inconnue de la bande.

Dans ce cas, les inconnues G.P.S.seraient au nombre de six (6) par bande, et il ne pourrait plus être question d'appuyer un bloc sur un seul point, ou sur les mesures G.P.S.seules, il serait, alors, nécessaire de disposer d'au moins deux points au sol connus dans trois coordonnées, de préférence le plus éloignés possible, c'est-à-dire au début et à la fin du vol, et le plus écartés possible l'un de l'autre, pour que l'échelle soit bien transmise.

Une nouvelle fois on remarquera que toute complication du modèle, même totalement justifiée, entraînera la perte de son efficacité et de sa robustesse qui devraient être appréciées en fonction de l'objectif visé: si les mesures G.P.S, seules, doivent appuyer un bloc, il n'est pas possible de tenir compte des dérives des translations dans le temps, il faudra donc se placer dans des situations où ces dérives seraient négligeables, c'est-à-dire ne faire les vols d'observations que si la G.D.O.P. est très faible, <5 par exemple; dans le cas contraire, il faudrait disposer de points au sol plus nombreux pour, à la fois, appuyer le bloc, et pour fournir les paramètres d'un modèle plus compliqué, donc moins efficace et, à la limite extrême de complication, sans le moindre intérêt.

11.5. TRAITEMENT DES INFORMATIONS

LES CALCULS INDEPENDANTS DE LA COMPENSATION DU BLOC.

11.5.1.GENERALITES

La société SERCEL est l'auteur du logiciel qui a été utilisé pour tirer des observations brutes du récepteur TR5-S-B les coordonnées des sommets perspectifs, rien n'a été publié sur ce sujet d'autre que la référence déjà citée:
[41 R.BROSSIER IGN- G.NARD- J.RABIAN-R.GOUNON SERCEL déjà signalés] présentée à la suite des essais d'Amiens.

Les essais d'utilisation directe des mesures G.P.S., en temps réel s'étant révélés infructueux, le fabricant du récepteur avait mis au point un logiciel de traitement des mesures légèrement différé, il s'agissait d'un calcul de lissage en retour, qui restait sa propriété qu'on a tenté de décrire plus loin.

Ce logiciel, lui-même, n'avait pas fait l'objet de publications dans la presse spécialisée, mais il appartient à une catégorie bien connue de logiciels de calcul des mesures G.P.S. On pourra consulter sur ce sujet, notamment l'article d' Alfred KLEUSBERG [53], au paragraphe et plus loin suivant on détaillera les possibilités de calcul d'un logiciel qui pourrait être celui de la SERCEL.

11.5.2. LES "MESURES" GPS DE POSITION DES SOMMETS PERSPECTIFS.

DESCRIPTION GENERALE

Selon les explications recueillies auprès de la SERCEL, le logiciel mis en oeuvre utiliserait, à la fois, les mesures de pseudo-distances, lesquelles sont bruitées de plusieurs mètres, et un comptage de battements entre le récepteur et l'émetteur pour calculer l'effet DOPPLER, et la phase dont le bruit n'est que de quelques centimètres.

Le traitement commencerait par un passage mettant en oeuvre, simultanément, deux sommets consécutifs, en reprenant, dans chaque séquence de calcul, la position du second sommet calculée dans la séquence précédente, les mesures des pseudo-distances et l'intégration des battements DOPPLER.

Par conséquent, les positions des premiers sommets seraient bruitées de plusieurs mètres, et cet état de choses s'améliorerait progressivement, puisque chaque séquence de calcul prendrait en compte la position calculée à la séquence précédente, et remettrait en cause la position de son second sommet, pour déterminer le sommet suivant, en faisant intervenir les mesures des pseudo-distances et la mesure DOPPLER, laquelle met en oeuvre, simultanément, les positions de deux sommets successifs puisqu'elle porte sur la mesure, directe, d'une différence.

Les coordonnées fournies par les mesures de pseudo-distances définiraient, par les liaisons qui sont assurées entre elles par les mesures DOPPLER, un référentiel moyen dont la valeur s'améliorerait au cours de la réception, par filtrage du bruit sur les pseudo-distances.

Le calcul en retour serait identique, il lisserait les résultats du calcul déjà exposé qui deviendraient, ainsi, presqu'indépendants de leur position et de l'ordre dans lesquels ils ont été enchaînés dans le premier passage. L'intérêt est de ne manipuler, dans un pas de calcul, que six [53 KLEUSBERG] ou huit inconnues à la fois : trois (3) inconnues de position sur deux (2) sommets et un biais d'horloge par sommet, sauf si ce dernier peut être considéré comme constant ou bien être modélisé, ou éliminé, comme dans KLEUSBERG, par des différences faites entre les mesures. Les résultats sont légèrement différents de ceux qui seraient obtenus dans un calcul classique par les moindres carrés, qui prendrait toutes les mesures en compte simultanément, les corrélations existantes entre les mesures DOPPLER sont négligées, par ailleurs c'est la précision des mesures de pseudo-distances qui conditionne la précision des résultats du calcul, dans la référence [41 BROSSIER] la SERCEL fixe la précision des résultats à:

$$(\sigma_p + \sigma_d)/\sqrt{(n-1)}$$ avec:

σ_p écart type sur la position déterminée à l'aide des pseudo-distances,
σ_d écart type sur la position déterminée par les mesures Doppler,
n nombre de sommets mesurés soit un toutes les 0,6 seconde pour le récepteur de la SERCEL.

Evidemment σ_d est négligeable devant σ_p.
On a, sensiblement la précision suivante:

$$\sigma_p/\sqrt{n}$$

Un auteur a pu dire qu'on utilise les signaux basse fréquence pour résoudre les ambiguïtés de GPS, et les signaux de haute fréquence pour mesurer les distances.

Le fait d'utiliser toutes les pseudo-distances pour calculer toutes les positions successives des sommets, et de les relier par les mesures DOPPLER, revient à placer les résultats dans un système de référence défini comme la moyenne des référentiels des positions obtenues par les pseudo-distances, même si le récepteur s'est déplacé au cours de la mesure : cette moyenne a un écart-type beaucoup plus faible que celui affectant une mesure individuelle, il faut se rappeler que l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux mesures du récepteur SERCEL est de 0,6 seconde, le nombre des mesures est donc très important, il serait possible, avec des durées de réception sans interruption assez longues, d'atteindre une précision sur la moyenne des positions déterminées par les pseudo-distances seules du même ordre de grandeur que celle de la position relative obtenue par l'intégration DOPPLER, c'est à dire quelques centimètres; toutefois il ne faut pas perdre de vue que les positions déterminées ne sont pas celles des sommets perspectifs eux-mêmes mais celles de points de la trajectoire de l'avion déterminés à des intervalles réguliers, à partir desquels les positions des sommets perspectifs sont interpolées linéairement; l'instant de la prise de vue étant déterminé à 1/1000ème de seconde près, l'avion parcourt, pendant ce temps pourtant très bref : 0,16m . Des auteurs ont utilisé des méthodes d'interpolation plus compliquées [55 LUCAS] mais celà ne saurait rattraper l'erreur commise sur la synchronisation .

11.5.3.METHODE DE CALCUL.

DESCRIPTION DETAILLEE

Il s'agit de la reconstitution de la méthode qui a dû être utilisée par la SERCEL faite dans le double but d'éclairer le lecteur et de vérifier que la précision annoncée sans justifications peut bien être atteinte.

Compte tenu du matériel utilisé par la SERCEL il n'a certainement pas été possible de calculer en bloc toutes les observations G.P.S, par conséquent les mesures étant toutes liées entre elles par les comptages DOPPLER, la résolution du système a dû se faire par séquences successives.

On suppose qu'au temps to on disposait d'une position approchée x_o et de sa matrice de covariance $v(x_o)$.

On cherche à obtenir une position x_{n+1} à partir d'une position x_n. Pour cela on emploie les observations des pseudo-distances P_{n+1} faites au temps t_{n+1} et les observations des battements cumulées, $D_{n,n+1}$ entre les temps t_n et t_{n+1}, de la fréquence propre au récepteur et de la fréquence reçue du satellite, on aura, après toutes les corrections appropriées:

$$P = L + B$$
$$D = L_{n,n+1} - B_{n,n+1}$$

où L est la distance géométrique entre le satellite et le récepteur B est le biais d'horloge, ou la différence de biais inconnus, exprimée en distance

$L_{n,n+1}$ est la distance géométrique entre les temps n et n+1

$B_{n,n+1}$ est la différence des biais d'horloge entre les deux positions.

Les équations d'observation seront:

$$A_{n+1}\ .\ dx_{n+1} = P_{n+1c} - P_{n+1}$$

l'indice c indiquant une valeur calculée

$$\begin{bmatrix} A_n & ,- A_{n+1} \end{bmatrix} . \begin{matrix} dx_n \\ dx_{n+1} \end{matrix} = D_{n,n+1c} - D_{n,n+1}$$

Avec $dx_n = x_n - x_o$ et

$dx_{n+1} = x_{n+1} - x_n$

Si on note la matrice des covariances des pseudo-distances par vp, la matrice des covariances des battements par vb, et la matrice des covariances du point précédent par vx, on pose la matrice normale pour deux sommets successifs de la manière suivante:

$$N = \begin{vmatrix} A^T_n\ .vb^{-1}.A_n + vx^{-1} & -A^T_n\ .vb^{-1}\ .A_{n+1} \\ -A^T_{n+1}\ .vb^{-1}.\ A_n & A^T_{n+1}\ .(vb^{-1} + vb^{-1}).A_{n+1} \end{vmatrix}$$

$$L = \begin{vmatrix} A^T_n\ .vb^{-1}.D_{n,n+1} \\ A^T_{n+1}.(vp^{-1}.P_{n+1} - vb^{-1}.D_{n,n+1}) \end{vmatrix}$$

En définitive:

$$N\ .\ dx = L$$

L'estimation des moindres carrés sera:

$$\begin{vmatrix} dx_n \\ dx_{n+1} \end{vmatrix} = N^{-1}\ .L$$

Puis $x_n = x_{on} + dx_n$

$x_{on+1} = x_{on} + dx_{n+1}$ mais aussi vx sera, pour le calcul du sommet suivant la sous-matrice inférieure 4,4 droite de N^{-1}.

Le calcul peut être mené en temps réel et l'accumulation des mesures donne des positions dont la précision s'améliore avec le temps, c'est le calcul direct de "filtrage" qui est combiné avec un calcul en retour, partant de la dernière mesure pour revenir vers la première, dans une opération de "lissage" la terminologie adoptée est celle du filtre de KALMANN, mais les calculs sont différents et plus simples. Il est, par conséquent, nécessaire de conserver toutes les mesures enregistrées à l'aller, dont les calculs peuvent s'exécuter en temps réel, pour les reutiliser, au retour, au cours du calcul de lissage qui ne peut s'effectuer qu'en différé, même si ce différé est léger. On

aura remarqué qu'au cours des expériences relatées dans le texte, les coordonnées des sommets perspectifs de deux bandes ont été perdues par un défaut d'enregistrement des mesures, c'est, très probablement, que les calculs de lissage n'ont pas pu être effectués parce que les enregistrements n'avaient pas été faits ou étaient mal faits.

11.5.4.LA PRECISION DES MESURES ET DES COORDONNES DES SOMMETS PERSPECTIFS.

On aura remarqué qu'à la première observation le poids de la détermination est sensiblement proportionnel à :

$vp^{-1} + vb^{-1}$, voir l'angle inférieur droit de la matrice normale.

Pour les sommets suivants on peut considérer qu'ils sont déterminés par i-1 mesures combinées comprenant chacune suivant la figure 18:

Une mesure de pseudo-distance de la constellation des satellites aux i-1 sommets précédents, associée à:

Une mesure des battements cumulés de tous ces i-1 sommets à partir des cinq satellites (tous les sommets qui précèdent celui sur lequel le calcul de précision est effectué) au sommet i considéré.

Une mesure de pseudo-distance des satellites au sommet i considéré, lui-même.

Un calcul grossier, dans lequel des scalaires de variances remplacent les matrices elles-mêmes, donnerait les variances suivantes:

pour les i-1 mesures issues des sommets précédents:

$(vb + vp) /i-1$

pour les cinq mesures de pseudo-distances faites sur le point lui-même : vp, évidemmment le poids des mesures en i sera:

$i-1/(vb+vp) + 1/vp$ dont l'inverse donne une approximation de la variance:

$$(vp+vb)/ i + vb/vp$$

vb/vp étant négligeable on remarque que l'écart-type diminue du sommet 1 au sommet i .

Après calcul en retour, si on fait la moyenne des résultats des deux calculs, le calcul de filtrage et le calcul de lissage, le poids en chaque sommet sera :

$i-1/(vb+vp) + 1/\sigma p + n-i-1/(vb +vp) +1/vp$ la variance sera approximativement égale à :

$$(vp +vb/vp)/(2.vb/vp + n)$$

Il est possible de retrouver ces résultats à partir de simulations qui ont mené à la démonstration suivante:

On forme l'hypothèse que la géométrie relative des satellites et du récepteur reste la même pendant tout le vol (G.D.O.P.constante) ou qu'elle varie peu.

La matrice normale peut s'écrire:

$$N = \begin{vmatrix} n.vb^{-1} + vx^{-1} & -n.vb^{-1} \\ -n.vb^{-1} & n.(vb^{-1} + vp^{-1}) \end{vmatrix}$$

La sous-matrice n reste invariable par hypothèse tout au long du calcul, on peut lui appliquer une transformation orthogonale qui donnera:

$$R^T.n.R = \begin{vmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d \end{vmatrix}$$

a, b, c, et d sont les valeurs propres de n.

La matrice N peut être décomposée en quatre sous-matrices emboitées indépendantes telles que:

$$p = \begin{vmatrix} a.vb^{-1} + vx^{-1} & -a.vb^{-1} \\ -a.vb^{-1} & a.(vb-1 + vp^{-1}) \end{vmatrix}$$

On rappelle que vb est négligeable devant vp et que vb^{-2} est aussi négligeable devant $vb^{-1}.vp^{-1}$.

A l'époque 1 et au sommet 1 on calcule la position à l'aide des pseudo-distances seules:

$vx = vp/a \quad vx^{-1} = a.vp^{-1}$;

A l'époque 2 et au sommet 2 on a:

$$\begin{vmatrix} a.(vb^{-1} + vp^{-1}) & -a.vb^{-1} \\ -a.vb^{-1} & a.(vb^{-1} + vp^{-1}) \end{vmatrix}$$

dont le déterminant sera, en négligeant vp^{-2}:

$D2 = 2.a^2.vp^{-1}.vb^{-1}$

d'où $vx_2 = (vp + vb)/2.a$;
on néglige σb devant vp, d'où $vx^{-1} = 2.vp^{-1}$

A l'époque 3 pour le sommet 3 on aura:

$$\begin{vmatrix} a.(vb^{-1} + 2.vp^{-1}) & -a.vb^{-1} \\ -a.vb^{-1} & a.(vb^{-1} + vp^{-1}) \end{vmatrix}$$

dont le determinant sera:

$D3 = 3.a^2.(vp^{-1} + vb^{-1})$

d'où $\sigma x_3 = (vp + vb)/3.a$ et $vx^{-1} = 3.a.vp^{-1}$

A l'époque i pour le sommet i

$$\begin{vmatrix} a.(vb^{-1} + (i-1).vp^{-1}) & -a.vb^{-1} \\ -a.vb^{-1} & a.(vb^{-1} + vp^{-1}) \end{vmatrix}$$

dont le determinant sera:

$Di = i.a^2.(vp^{-1} + vb^{-1})$; d'où $vx = (vp + vb)/i.a$

Au calcul de lissage, pour le même sommet i on aura: $vx_{n-i} = (vp + vb)/(n-i).a$;

$vx^{-1}_{n-1} + vx^{-1}_{i} = n.a\ /(vb + vp)$ d'où :

$vx = (vp + vb)/n.a$ en faisant la transformation inverse pour revenir à la matrice d'origine:

$$n^{-1} = R \cdot \begin{vmatrix} 1/a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/d \end{vmatrix} \cdot R^T \quad \text{d'où:}$$

$vx = vp + vb\ /n$

Si on remarque que:
$vb = (0{,}02m)^2$ et
$vp = (6{,}00m)^2$
La variance sera approximativement égale à :

$\boxed{vp/n}$

Soit:
$\sigma x = 6{,}00\ /\sqrt{}$(durée de la prise de vue/0,6sec) soit encore:
$4{,}65/\sqrt{}$(durée de la prise de vue en secondes) par exemple pour une durée de prise de vue d'une bande de cinq minutes (300 sec) la précision sera égale à:

$\boxed{4{,}65/\sqrt{}300 = 0{,}27m}$

La précision du résultat du calcul ne dépend que de celle obtenue sur les pseudo-distances et de la durée de la réception sur la même constellation de satellites sans interruption.

Le résultat qu'on vient de donner dépend de l'estimation d'un certain nombre de valeurs chiffrées :

On a estimé, comme indiqué plus haut, que la précision sur une mesure de pseudo-distance était de l'ordre de 2,00m en écart type, pour une G.D.O.P. de l'ordre de 6, soit:

$$\sqrt{\sum_{1}^{5} (A^T_{ii}.A_{ii})^{-1}} = 6$$

D'où la valeur de la trace de la matrice des variances et des covariances v:

$6^2 \times 2^2 = 144$ soit, par coordonnée, enfin, en supposant que tous les termes de la diagonale principale sont égaux:

6,00m d'écart type sur chaque coordonnée inconnue dX, dY dZ,et B.

Rappelons la forme de A:

$$A = \begin{vmatrix} DX_1/L_1 & DY_1/L_1 & DZ_1/L_1 & -1 \\ DX_2/L_2 & DY_2/L_2 & DZ_2/L_2 & -1 \\ DX_3/L_3 & DY_3/L_3 & DZ_3/L_3 & -1 \\ DX_4/L_4 & DY_4/L_4 & DZ_4/L_4 & -1 \\ DX_5/L_5 & DY_5/L_5 & DZ_5/L_5 & -1 \end{vmatrix}$$

Avec:

DX_i Différences de coordonnées X entre le satellite i et le récepteur calculées, d'après les valeurs approchées de l'estimation initiale ou précédente .

L_i Distances entre le satellite i et le récepteur calculées de la même manière.

après normalisation on a:

$$n11 = \sum_{i=1}^{i=5} (DX^2/L^2)$$

$$n22 = \sum_{i=1}^{i=5} (DY^2/L^2)$$

$$n33 = \sum_{i=1}^{i=5} (DZ^2/L^2)$$

$n44 = 5$ (Nombre des satellites observés)

$$n14 = -\sum_{i=1}^{i=5} (DX/L)$$

$$n24 = -\sum_{i=1}^{i=5} (DY/L)$$

$$n34 = -\sum_{i=1}^{i=5} (DZ/L)$$

$$n12 = \sum_{i=1}^{i=5} (DX.DY/L^2)$$

$$n13 = \sum_{i=1}^{i=5} (DX.DZ/L^2)$$

$$n23 = \sum_{i=1}^{i=5} (DY.DZ/L^2)$$

On doit signaler que la formule du calcul d'erreur donnée par la SERCEL dans l'article déjà cité traitant du vol d'Amiens [4,BROSSIER et autres,1986] se limite aussi à:

(vp + vb)/n-1

La différence avec ce qu'on vient d'indiquer est tout à fait négligeable, elle montre également que le facteur limitant est, d'une part, la précision de la mesure sur les pseudo-distances, d'autre part la durée de la réception de la même constellation de satellites sans interruption avec la limite de résolution limitant l'amélioration de la précision a 0,12m

Si, finalement, on prend en compte le fait que perdre la réception sur un seul satellite redondant équivaut à changer de constellation on voit pourquoi les tentatives de recherches des cycles perdus auront toutes les chances de rester inopérantes: parce que les positions déterminées à l'aide de quatre satellites auront des biais différents de celles déterminées à l'aide de cinq satellites, et qu'on constatera un saut dans les positions déterminées par les pseudo-distances correspondant au biais propre des éphémérides du satellite dont la réception a été perdue et du biais de la réfraction sur le trajet entre ce satellite et le récepteur.

Il n'existe donc que deux voies à explorer si on veut augmenter la précision des coordonnées calculées des sommets déterminées à l'aide de G.P.S.:

1°/ Faire en sorte que la réception soit ininterrompue pendant toute la prise de vue en plaçant l'antenne du récepteur G.P.S. de façon à ce que les ailes de l'avion ne masquent pas la réception pendant les virages; la durée d'une prise de vue moyenne étant d'une heure environ on pourrait normalement disposer, avec l'appareil de la SERCEL, de 6.000 mesures de pseudo-distances consécutives, il serait alors possible en principe, pour l'écart-type sur une coordonnée calculée, de descendre au-dessous du décimètre, sans changer de logiciel, mais ce serait sans compter, d'abord, avec la limite de résolution des mesures des pseudo-distances, soit 0,12m, et de la précision de la mesure de l'instant d'ouverture de l'obturateur de l'objectif. Les temps de pose allant de 1/400 à 1/700ème de seconde, peut-on espérer mieux que le 1/1000ème de seconde sur la précision de la mesure de l'instant de la prise de vue? Or ce temps représente un déplacement de l'avion de 0,16m !

Pour ces raisons les résultats publiés à l'étranger semblent trop précis pour pouvoir être considérés sans la plus grande circonspection.

2°/ Utiliser une autre méthode de calcul des coordonnées des sommets perspectifs à partir des mesures brutes enregistrées, ne mettant en oeuvre que les mesures des battements et de la phase à l'aide d'un logiciel tel que celui décrit par M.P.-WILLIS [59] pour le positionnement cinématique. Mais, alors, ce logiciel traitera l'ensemble des observations d'une bande ou d'un bloc simultanémment, et non pas par groupe de huit inconnues, il faudrait, alors, disposer de moyens de calcul plus importants, ce qui ne constitue, d'ailleurs, pas un obstacle mais, alors, il faudra disposer impérativement d'un récepteur au sol, sur le chantier, pour lever les ambiguïtés et le problème de la précision de la mesure de l'instant de la prise de vue restera posé.

11.6.RETRAITEMENT DES COORDONNEES DES SOMMETS

Les résultats fournis par le fabricant étaient exprimés en coordonnées géographiques qui n'étaient pas directemment utilisables dans les calculs du bloc :

Latitude - Longitude - Hauteur au dessus de l'ellipsoïde du système W.G.S. 72 puis W.G.S. 84

Les latitudes et longitudes étaient exprimées en degrés, minutes et dix-millièmes de minutes alors que la résolution des mesures étaitun peu supérieure : quelques centimètres (12) pour les pseudo-distances, 10^{-10} secondes, et quelques millimètres (2) pour la phase, soit 1/1.000 ème de tour; il n'était donc pas raisonnable d'attendre, dans la situation présente, mieux que 0,14 m en X et 0,19 en Y; on verra qu'on était très proches de ces valeurs.

On avait pensé qu'il serait, peut-être, possible d'obtenir mieux, et on avait demandé à la SERCEL de fournir les coordonnées en millionièmes de minute, les résultats, au niveau des résidus d'ajustement avaient été à peine meilleurs, ceci paraissait normal, puisque lorsqu'on a fait les calculs d'erreur on a vu qu'on obtenait un écart-type de l'ordre de 0,25m, de plus si on tient compte de la précision de la mesure de l'instant de la prise de vue on avait une erreur possible de l'ordre de 0,16m, c'est-à-dire 1/1000ème de seconde.

Une saisie de ces résultats était faite pour transformer les coordonnées géographiques W.G.S. 72 ou 84 en coordonnées LAMBERT II pour Vichy et Albertville, LAMBERT III pour Lunel, sur l'ellipsoïde de CLARKE Français, selon le schéma de calcul donné sur la figure 15 qui est un document S.G.N. dans lequel on est passé de la position extrême de la droite par une transformation -2 aux valeurs en radians des coordonnées géographiques, puis des coordonnées géographiques en radians aux coordonnées trirectangulaires W.G.S. par une transformation +1, puis aux coordonnées trirectangulaires de gauche pour changer d'ellipsoïde de référence par une transformation 4, on est ensuite redescendu sur le côté gauche de la figure vers des coordonnées géographiques par une transformation -1, pour obtenir, par une transformation +3 les coordonnées LAMBERT des points d'appui.Ce n'est évidemment pas le chemin idéal à retenir dans le dispositif définitif.

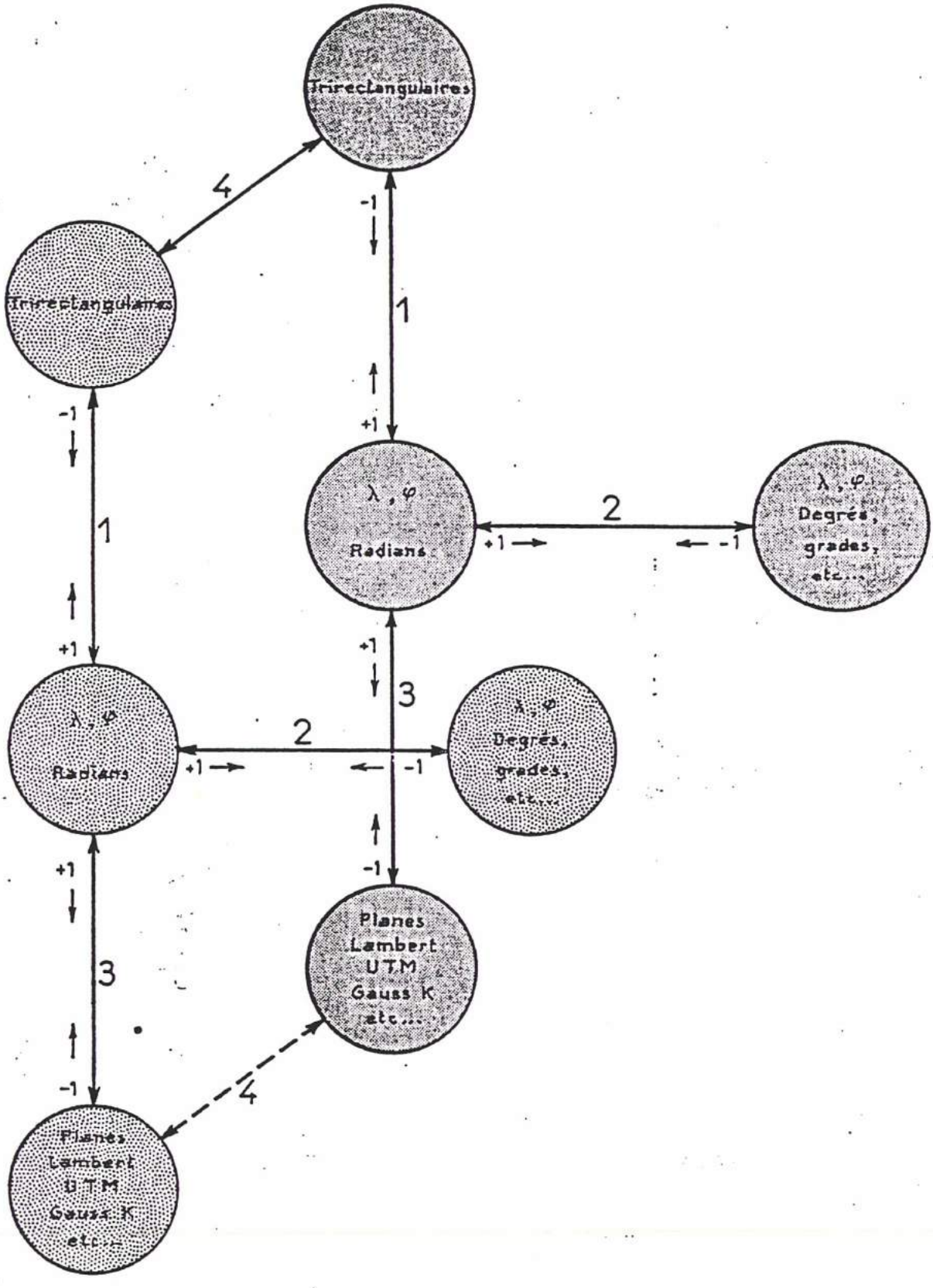
Les coordonnées des sommets venant de mesures G.P.S. étaient ensuite entrées dans un fichier spécial du programme FAISCEAUX transformé pour accepter les données G.P.S. et Statoscope associées ou non, dans sa version VII.

Toutes ces saisies étaient faites manuellement; dans une exploitation normale, il serait plus simple que les résultats du calcul G.P.S. soient fournis directement en Tridimensionnel W.G.S. 84. Il serait alors plus rationnel de passer à des coordonnées Tridimensionnelles sur l'ellipsoïde de CLARKE FR par une transformation de similitude dans l'espace (trois translations, trois rotations très petites, une homothétie également petite) notée 4 sur la figure 15, pour revenir à des coordonnées géographiques, qui seraient transformées dans la projection des points d'appui et des points de contrôle.

PROGRAMME GTSCØ

Transformation de coordonnées
Changement de système géodésique

Figure 15



S'il était un jour possible de se passer de points d'appui au sol, il serait alors préférable de passer du système tridimensionnel G.P.S. à un système tridimensionnel local, dans lequel, d'ailleurs, le programme FAISCEAUX exécute les calculs, ceci à l'aide des formules de l'IGG DUFOUR [56].

Si on veut, un jour, entrer directement les mesures G.P.S. dans le programme FAISCEAUX, comme on le fait pour le statoscope, les positions des satellites seront calculées, comme cela se fait actuellement, dans le système tridimensionnel W.G.S. 84, alors tout autre moyen que de transformer ces coordonnées, directement sur le calculateur du récepteur, en Tridimensionnel local [56] serait compliqué et, peut-être, moins précis.

Il est également certain que le calcul simultané du bloc et des mesures brutes G.P.S. permettrait de tenir compte des corrélations qui pourraient exister entre les mesures DOPPLER, lesquelles sont forcément négligées dans la procédure de calcul actuelle qui ne prend en compte que les termes de la matrice normale, voisins de la diagonale principale. Il ne faudrait toutefois pas cacher les difficultés que cela entraînerait.

Les vols de Vichy et de Lunel comportent environ, chacun, 75 clichés, Albertville et Manosque en comporte seulement 60.

Afin de ne pas encombrer les fichiers, on pourrait envisager de ne prendre en considération que les mesures associées aux points encadrant les sommets, puisqu'en 0,6 seconde l'avion ne parcourt que 100 mètres, on aurait de l'ordre de 150 points G.P.S. avec de six (6) à huit (8) équations d'observation par sommet. La charge de calcul resterait supportable mais on améliorerait beaucoup moins le bruit sur les positions des sommets calculées par les pseudo-distances seules ($\sqrt{150} = 12$).

Prendre en compte toutes les mesures impliquerait, pour un vol d'une heure, la prise en charge de 6.000 points (3.600/0,6) avec toujours de six à huit équations par sommet soit de 36.000 à 48.000 équations d'observation ce qui paraît difficile actuellement, mais pas impossible à l'avenir, encore faudrait-il y trouver un avantage ce qui n'est pas absolument certain.

Aucune proposition ne peut être rejetée a priori, on n'est qu'au début de l'expérimentation réelle dans ce domaine. On pourra sans doute maîtriser le nombre minimum de points pris en compte afin qu'il soit suffisant pour améliorer le bruit sur les points calculés par les pseudo-distances seules, tout en restant dans des limites raisonnables quant au nombre des équations d'observations à manipuler au cours des calculs.

Par ailleurs, la prise en compte des mesures des pseudo-distances ne s'imposerait probablement plus, seules les mesures de comptage des battements et de la phase pourraient être employées. L'avantage serait de ne plus prendre en compte que les mesures encadrant un sommet perspectif, ce qui allégerait l'encombrement en mémoire. Il s'agirait, évidemment d'un tout autre logiciel, associant les mesures G.P.S. brutes aux mesures photogrammétriques. En outre les méthodes de calcul s'apparenteraient plus aux procédés de compensation dits G.P.S.cinématiques qu'à celui mettant en oeuvre, simultanément les mesures de battements et les pseudo-distances. Voir à ce sujet [WILLIS 62].

11.7.LES CHANTIERS .

AMIENS I et II (blocs normaux),LUNEL et VICHY (Blocs homogènes)

Ils sont décrits en détail en ANNEXE IV.

Il faut toutefois insister sur le fait que les chantiers d'AMIENS ont été improvisés et que leur objectif initial était limité à des essais de réception des signaux G.P.S à bord d'un appareil considéré comme rapide.

De fait on pensait, alors (1986), en raison de la vitesse de l'avion, que le niveau Signal/Bruit (S/N ou SNR) serait tellement mauvais qu'on ne pourrait pas utiliser les mesures; comme les résultats avaient dépassé toutes les espérances on avait décidé de les exploiter, essentiellement pour préparer la campagne suivante, de plus cette exploitation nous a permis de constater qu'il était absolument nécessaire de disposer de blocs homogènes. Rien que pour cela les chantiers d'AMIENS ont eu leur utilité.

Avion lent BLOCS NORMAUX 1986 AMIENS I AMIENS II	Avion rapide BLOCS HOMOGENES 1987 LUNEL VICHY

De même les chantiers d'ALBERTVILLE et de MANOSQUE sont des improvisations. l'usage qu'on a pu en faire n'était absolument pas prévu, c'est pour cela que ce sont, aussi, des blocs normaux.

11.8.CALCULS D'AEROTRIANGULATION DES BLOCS APPUYES SUR DE NOMBREUX POINTS CONNUS AU SOL POUR SERVIR D'ELEMENT DE COMPARAISON.

La description des chantiers et les détails des calculs d'aérotriangulation classique sont donnés en ANNEXE V on ne fera que rappeler ici les résultats essentiels.

Ecarts-types sur les points de vérification			
CHANTIERS	X	Y	Z
Amiens I	0.27	0.27	0.35
Amiens II	0.30	0.40	0.38
Lunel	0.75	0.75	0.43
Vichy	0.55	0.59	0.43

11.9. LES RESULTATS DU CALCUL DES BLOCS APPUYES SUR QUELQUES APPUIS ET LES MESURES G.P.S

On pourra se reporter à l'ANNEXE VI traitant des résultats des calculs G.P.S qui étaient trop nombreux et trop touffus pour entrer dans ce chapitre.

11.9.1.AMIENS I (Bloc normal)

Les résultats indiqués ici ne portent que sur les points de vérification, ils sont donnés en précisant les écarts quadratiques moyens, les biais qui sont dûs à la mauvaise qualité des appuis et les écarts-types; les résultats complets pourront être trouvés en ANNEXE VI:

POINTS DE CONTROLE. (appuis terrain désactivés)		
Ecart moyen quad ϵ_x = 0,36 m ϵ_y = 0,18 m ϵ_z = 0,62 m	erreur moyenne biais x = 0,16 biais y = 0,13 biais z = 0,17	Ecart-type σ_x= 0,32m σ_y= 0,12m σ_z= 0,60m

Les appuis de terrain désactivés ne participaient pas à la compensation, on les a utilisés comme points de vérification.

11.9.2.AMIENS II.(Bloc normal)

Dans les mêmes conditions que ci-dessus on a trouvé, en utilisant deux jeux d'appuis:

Premier jeu d'appuis				Second jeu d'appui			
Ecarts quadratiques moyens sur les points de contrôle, biais et écarts types:							
	EMQ	BIAIS	ECART-TYPE		EMQ	BIAIS	ECARTS-TYPES
X=	0,77m	0,30m	0,71m	X=	0,94m	0,13m	0,93m
Y=	0,80m	0,60m	0,53m	Y=	0,55m	0,00m	0,55m
Z=	0,49m	-0,07m	0,48m	Z=	0,69m	0,03m	0,69m

11.9.3. LUNEL.(Bloc homogène)

Si on éliminait le maximum de points d'appui, pour ne laisser que quatre groupes de deux points aux angles du bloc, soit huit points d'appui en planimétrie, et onze points d'appui en altimétrie, également rassemblés en quatre groupes de deux ou trois points situés aux angles, et un seul point placé au centre du bloc on obtenait les résultats suivants :

Sur les points de contrôle :			
	Ecarts quadratiques moyens	Ecarts moyens (biais)	Ecarts-types (précision)
X	0,82 m	0,25 m	0,78 m
Y	0,79 m	-0,47 m	0,63 m
Z	0,60 m	0,32 m	0,51 m

On avait eu, visiblement, des problèmes dûs au choix, moins heureux, des points d'appui.

11.9.4.VICHY.(Bloc homogène)

On n'avait conservé, comme dans le bloc précédent, que quatre points aux angles du bloc en planimétrie et douze points d'appui en altimétrie groupés par deux ou trois points, aux angles et au centre du bloc. Le regroupement des points d'appui visait essentiellement à s'assurer qu'ils étaient de bonne qualité et à éliminer les fautes éventuelles, sans apporter un supplément d'appui, qui, si ils avaient été répartis uniformément dans le bloc, aurait masqué l'effet des mesures aéroportées. Les groupes de points agissaient, donc, en tant qu'appuis, comme un seul point, mais de meilleure qualité qu'un appui solitaire.

Les écarts moyens quadratiques, les écarts moyens, et les écarts-types, relevés sur les points de contrôle avaient été les suivants :

	Ecarts quadratiques moyens	Ecarts moyens	Ecart type
X	0,56 m	- 0,12 m	0,55 m
Y	0,59 m	0,30 m	0,51 m
Z	0,66 m	0,00m	0,66 m

11.9.5.LES EXPERIENCES ETRANGERES DE MEME NATURE.

Les critères d'appréciation de la qualité des résultats des auteurs étrangers ne sont pas comparables à celles qu'on a cru bon d'adopter; elles portent, soit sur des résidus d'ajustement qu'on peut minimiser autant que l'on veut, soit sur les écarts entre les coordonnées des sommets obtenues par aérotriangulation classique appuyée sur des sommets balisés et les coordonnées G.P.S calculées par des logiciels non définis ou

les coordonnées G.P.S calculées par des logiciels non définis ou différents de celui qu'on a pu employer; car les auteurs étrangers ont pu, le plus souvent, bénéficier de mesures G.P.S faites sur le site en synchronisation avec celles faites à bord, ce qui permettait de lever les ambiguïtés et de travailler exclusivement avec les mesures DOPPLER et de phase sans être gênés par l'imprécision des pseudo-distances. On verra, par contre, que les pertes de réception sont, alors, définitivement, impossibles à rattraper.

11.9.5.1.[60 EGON DORRER & CHRISTIAN SHWIERTZ.] vont plus loin encore qu'on aurait osé le faire en déclarant:

"Le but principal de l'aérotriangulation appuyée sur G.P.S est la réduction des appuis géodésiques: le modèle fonctionnel doit être orienté vers une solution pour laquelle on devrait pouvoir se passer de tout point d'appui au sol".

Dans ce cas le seul modèle qui resterait serait celui qu'on a proposé.

11.9.5.2.[Essais de JAMES.R.LUCAS transmis par Mlle VEILLET].

Cet auteur avait exploité deux essais:

Le premier du 22 au 26 Septembre 1986 à ROCKDALE au TEXAS, le second deux semaines plus tard à YAKIMA: Etat de WASHINGTON.

Le récepteur utilisé était un T.I.4100 à deux longueurs d'ondes L1 et L2 associé à une chambre R.C.10 de WILD de 152mm de focale; la G.D.O.P étant inférieure à 10.

L'avion, un AEROCOMMANDER comme pour nos expériences d'AMIENS. avait observé trois(3) bandes de photographies au-dessus d'un tronçon d'autoroute l'angle de dérive avait été noté. les recouvrements longitudinaux étaient de 80% et les recouvrements transversaux de 60%. il s'agissait donc d'un bloc homogène. l'échelle des photographies était du 1/3.000ème , l'altitude du vol était d'environ 500m: chaque bande comprenait:

27 photos au TEXAS et
20 photos à YAKIMA.

L'avion faisait un point fixe sur un point connu pour lever les ambiguïtés. au départ et au retour. sur un point géodésique connu et la reception était maintenue entre ces deux points.

Finalement. au Texas. à la suite de divers incidents. seulement six (6) photos par bande on pu être exploitées. l'ensemble des photographies exploitables couvrait quatre (4) points d'appui balisés connus dans leurs trois coordonnées et de sept (7) points d'appui altimètriques. Les mesures des coordonnées clichés des points ont été faites dans le sens du vol comme celà se fait à l'I.G.N. et perpendiculairement au sens du vol; ce mode opératoire serait. selon cet auteur. standard au service hydrographique Américain (N.O.A.A); il vise. probablement. à éviter le report des points de bande à bande par marquage.

Pour le vol de Washington. aussi. il n'avait pas été possible d'exploiter toute la prise de vue. il avait fallu se contenter de deux bandes de 10 photographies chacunes. Les appuis connus dans leurs trois coordonnées étaient au nombre de neuf (9). et les appuis altimètriques au nombre de huit (8).

L'auteur estimait par un calcul d'erreur que les "sommets perspectifs pouvaient être connus. par la voie photogra-

métrique seule, de 2 à 5 cm près.

Les positions des points mesurées par G.P.S étaient déterminées à la cadence de une par seconde, à partir d'un point connu dans le système de référence local, seules les différences de coordonnées étaient calculées dans ce système.

Les positions G.P.S des sommets perspectifs étaient interpolées sur les quatre (4) points mesurés les encadrant à l'aide d'un polynôme du troisième ordre.

Dans un second calcul tous les points d'appui étaient considérés comme des inconnues au même titre que l'attitude du vecteur antenne-chambre par rapport aux axes de référence de la chambre.

Dans l'expérience de Washington des pertes d'enregistrement avaient en outre gêné les calculs si bien que seules six (6) photos de la première bande et quatre photos de la seconde ont pu être exploitées; les résultats sont meilleurs que ceux d'AMIENS en raison, probablement, de la qualité des points d'appui prébalisés et, peut être, du modèle utilisé:

Au TEXAS après une transformation de translation et de mise à l'échelle l'auteur avait obtenu sur les sommets perspectifs:

σ_x = 0,03 m
σ_y = 0,06 m
σ_z = 0,06 m

Pour l'essai effectué dans l'Etat de WASHINGTON, par contre, le modèle utilisé comportait trois translations, trois rotations, mais pas de coefficient d'échelle; l'auteur avait obtenu:

σ_x = 0,05 m
σ_y = 0,04 m
σ_z = 0,06 m

Il est très intéressant de noter que l'auteur n'avait pas relevé de dérive dans le temps des paramètres des transformations qu'il avait appliquées.

11.9.5.3. On ne connait le second essai qu'indirectement il aurait été fait au dessus de la HOLLANDE à l'initiative du Service Topographique du RIJKSWATERSTAAT ses résultats seront décrits dans une communication qui sera présentée à KYOTO en Juillet 1988 par D.BOSWINKEL, R.WITHER et JWRD VEGT.

L'intérêt était que le récepteur utilisé était le même qu'à AMIENS, VICHY, ALBERTVILLE, MANOSQUE ou LUNEL il était décrit par [62 Joachim LINDENBERGER].

11.9.5.4. On avait eu connaissance d'un troisième essai qui avait eu lieu le 17 Août 1987 sur le polygone d'essais de FREIMAN au Nord de MUNICH à l'aide de deux (2) récepteurs T.I.4100 de Texas Instruments à double fréquences l'un placé à bord d'un DORNIER 28 et l'autre sur l'aéroport de NEUBIBERG la réception s'était faite sur quatre(4) satellites, c'est-à-dire sans redondance.

L'antenne de réception était une DORNE-MARGOLIN Inc.N.Y.comme à LUNEL, VICHY, ALBERTVILLE et MANOSQUE. La chambre de prise de vues était une R.M.K.15/23 de ZEISS Oberkochen les lectures de dérive et de cabrage étaient faites, par bande, sur la monture de la chambre. Les prises de vues faites à une altitude de 900 m étaient à l'échelle du 1/6.000ème, avec un recouvrement longitudinal de 80% et transversal de 30%, il s'agissait donc d'un bloc normal. De nombreuses pertes de réceptions ont dûes être rattrapées par un programme spécial.

Une seule des deux bandes observées, qui comportait 17 photographies, avait pu être utilisée; l'auteur considérant qu'en-dessous d'un rapport signal/bruit de 40 dB, et qu'au-dessus d'une G.D.O.P de 6, les observations n'étaient plus fiables.

Seules les photographies de numéros impairs avaient été utilisées, il ne restait donc, finalement, de cette mission que huit (8) photographies utilisables.

Le modèle adopté par cet auteur comportait:

Trois (3) translations et
Trois (3) dérives de translation.

Les résultats, sur les sommets perspectifs, étaient alors les suivants:

σ_x = 0,01 m
σ_y = 0,76 m
σ_z = 0,18 m

Les conclusions de cet auteur étaient:
Qu'il faut se donner des paramètres de translation (3) par bandes, ainsi que leurs dérives dans le temps (3).

11.9.5.5. [61 P.FRIESS.].

Cet auteur semble avoir utilisé le même vol que celui décrit par BOWINKEL et autres plus haut (11.9.5.3.)

Ce vol avait été initié par le service topographique du RIJKSWATERSTAAT, avec la collaboration de K.L.M.AERO-CARTO, de l'Université Technique de Géodésie de DELFT et de la SERCEL.

Il comprenait sept (7) bandes, pour un total de 130 photographies, la chambre de prise de vues était une WILD R.C.10 de 213 mm de focale. Les recouvrements longitudinaux étaient de 70%, et les recouvrements transversaux de 50 à 60%, il s'agissait donc d'un bloc homogène.

L'échelle de prise de vues était du 1/3.800ème c'est à dire comparable à celle d'AMIENS, par contre le réseau des appuis était tout à fait exceptionnel:

47 points d'appui balisés connus dans leurs trois

coordonnées.

236 points de liaison balisés.
117 points de liaison naturels.
477 points de liaison marqués.

L'ordre de grandeur de la précision des déterminations des points d'appui était de:

σ_{xy} = 0,04 m
σ_z = 0,02 m

L'auteur avait pu partager les erreurs globales, dûes à G.P.S.et aux erreurs commises sur les projections du vecteur antenne-chambre (dérive, cabrage, horizon) des erreurs dûes à G.P.S seules, en remarquant que ces dernières n'affectaient que les distances entre sommets qui représenteraient ainsi la précision interne de la mesure, alors que les premières se portaient sur les erreurs commises sur les coordonnées.

σ_x = 0,06 m	
σ_y = 0,06 m	σ_s = 0,03 m
σ_z = 0,04 m	
Pour une G.D.O.P. de 3,5	

L'auteur avait adopté un modèle comprenant, pour le chantier dans sa totalité:

Trois (3) translations et
Trois (3) dérives de translations variant de 1 à 6 mm par seconde.

Le maximum de dérive relevé sur une bande était de 0,36 m.

On aurait pu confondre, sur AMIENS, une telle dérive avec une erreur sur l'identification d'un appui, elle nous aurait par conséquent été inaccessible. Il n'y a rien d'étonnant qu'avec des appuis plus précis ces dérives soient devenues apparentes.

Par contre sur les chantiers de LUNEL et VICHY une dérive des translations de 6 mm/seconde aurait donné 1,80 m sur une bande, elle aurait été aisémment perçue, on peut en conclure que les conditions d'observation des satellites n'étaient pas les mêmes, et probablement plus favorables lors des vols qu'on a exploités.

Il semblerait donc qu'avec des points d'appui balisés on puisse obtenir aux grandes échelles une précision supérieure au décimétre, ce qui ouvrirait des domaines d'application considérables dans la Photogéodésie. Il semblerait, aussi, que le traitement des observations par lissage des pseudo-distances par la phase ne permettrait pas d'atteindre ces précisions,puisque , comme on le verra plus loin, on est alors limité par la précision propre aux pseudo-distances et que la durée de la réception sans interruption de la même constellation de satellites agit comme l'élément de répétition de ces mesures, améliorant leur précision.

11.9.6.RESUME DES EXPERIENCES ETRANGERES.

Tous ces essais ont été menés quasimment simultanémment ils sont tous comparables entre eux, par contre ils ne peuvent pas être comparés aux résultats qu'on a présentés puisque les écarts donnés portent soit sur les coordonnées des sommets perspectifs, soit sur les distances entre ces sommets, soit encore sur les résidus d'ajustement sur les points d'appui, et non, comme on l'a fait, sur des points de vérification qui ne participent pas à la compensation. Malgré l'absence totale de concertation entre les expérimentateurs ils permettent, par leurs diversité, de se fixer un certain nombre de règles pour, notamment, le choix des modèles des mesures.

Plus la G.D.O.P. sera élevée plus il sera nécessaire d'adopter un modèle compliqué pour les mesures G.P.S.

Pour certains on devrait avoir:

G.D.O.P.< 10 (LUCAS) pour d'autres
< 6 (DORRER et SHWIERTZ) ;pour nos essais
On a eu < 5 (A VICHY) ; enfin on a relevé
= 3,5 (FRIESS).

Enfin une règle sage serait de fixer la limite du rapport signal/bruit (S/N) de le réception à 40dB

Des dérives des paramètres du modèle dans le temps devraient être adoptées, surtout si la G.D.O.P. varie au cours du vol, comme cela s'est passé pour le dernier nommé, toutefois on se doit de rappeler qu'on a eu la chance que cela ne se produise pas dans les essais qu'on a exploités.

11.10.CONCLUSIONS.

Le modèle qu'on a adopté est le seul convenable pour appuyer les blocs homogènes sur un seul point connu, avec des interruptions de réception en fin de bande et pour traiter, de façon simple, le problème de l'orientation du vecteur chambre-antenne.

IL NE COMPORTE QUE TROIS PARAMETRES DE TRANSLATION PAR BANDE.

L'adoption d'un modèle plus compliqué demanderait plusieurs points d'appui.

En tout état de cause le logiciel devrait permettre d'adapter le modèle aux différents cas rencontrés au cours des chantiers; actuellement il ne le peut pas.

Les résultats sont très encourageants dans la mesure où:

1°/ La constellation des satellites utilisables sera complétée rapidement. En 1989, trois satellites se sont ajoutés à ceux qu'on avait pu utiliser

2°/ Les émissions des satellites ne seront pas bruitées pour des motifs relevant des impératifs de la défense

nationale des Etats- Unis.

Or on ne rappellera jamais assez que ce système est avant tout militaire; les applications civiles n'en sont que les sous-produits.

Les essais entrepris devraient normalement se poursuivre afin de pouvoir appuyer des cartes à grandes échelles ou des tentatives de photogéodésie.

Les polygônes d'essai devraient alors être balisés. Il y aurait également intérêt à ce que la réception des signaux ne soit pas interrompue au cours des virages de l'avion, enfin il n'est pas certain que la précision attendue puisse être atteinte par la méthode de calcul dite des pseudo-distances lissées par la phase : La variance du résultat reste surtout dépendante de la précision de la mesure sur les pseudo-distances (P.D),qui pourrait être bruitée, et de la durée de la réception continue :

Variance = Variance des P.D./ nombre de mesures

Avec nombre des mesures = Durée de la réception sans interruption en secondes / 0,6 sec (Pour le récepteur SERCEL, bien sûr)

Les précisions annoncées par les participants au Congrès de KYOTO sont susceptibles, si ces résultats sont confirmés par des expériences plus importantes, en nombre et en étendue, de bouleverser la photogrammétrie et même la géodésie complémentaire à la condition qu'on traite, aussi, correctement, l'influence de la dérive, du cabrage et de l'inclinaison sur l'horizon, du vecteur antenne-chambre.

Les pertes de réception des signaux G.P.S. dans les virages de l'avion ne semblent pas, non plus, être une fatalité : J.R.LUCAS rapporte que, dans les essais qu'il a exploités, les expérimentateurs étaient parvenus à loger l'antenne de réception au sommet de l'empennage vertical de dérive de l'avion photographe AEROCOMMANDER, ceci afin d'éviter les masques formés par les ailes, lorsqu'il s'incline autour de son axe de roulis (x) pour tourner.

Nos essais ont montré que les algorithmes de rattrapage des cycles perdus dans les virages étaient restés, en grande partie, inopérants, et ce, malgré les efforts de SERCEL dans ce domaine, et le fait, très favorable, de la réception simultanée de cinq (5) satellites, qui laisse une mesure surabondante, laquelle peut être utilisée lorsque on constate une perte de réception sur un seul satellite.

Force est de constater, d'après les résultats, que, dans tous les cas, c'est le bloc photogrammétrique qui a assuré la continuité; il serait bien préférable de ne pas perdre la réception et de n'avoir à déterminer que trois paramètres de translation par bloc, et non par bande avec, en complément, éventuellement, trois dérives, dans le temps, de ces translations, on pourrait, ainsi, probablement, économiser l'observation des bandes transversales .

Les résultats sur G.P.S peuvent se résumer comme suit:

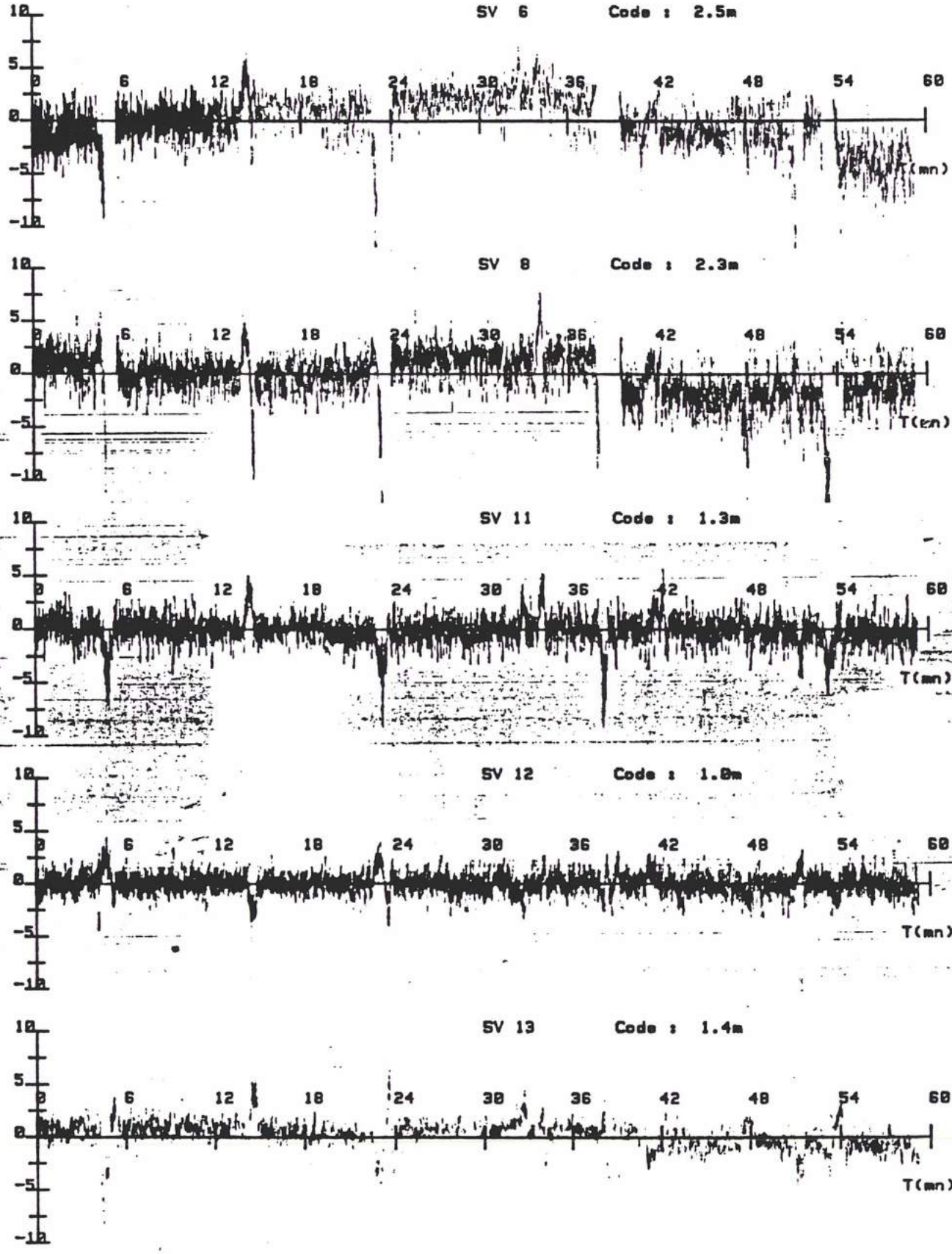
Ecarts-types sur les points de vérification

Chantier	Réseau complet d'appuis Au sol	Réseau d'appuis réduit et mesures de G.P.S
Amiens I	X-Y = 0,30 Z = 0,40	0,60 0,50
AmiensII	X-Y = 0,35 Z = 0,40	0,75 0,80
Lunel	X-Y = 0,75 Z = 0,45	0,75 0,50
Vichy	X-Y = 0,55 Z = 0,45	0,55 0,60

Ces résultats sont, bien sûr, arrondis aux 5 cm les plus proches.

Figure 16

NOISE
44 0.0000'N 4 0.0000'E4500.00m
Mob : MONT/Creil 4.0 4001
3D+T R D 50 3
Cal: 0.00-0.35 1.58 0.18-2.52 7h 0
0.00-0.39 1.33 0.01-2.55 8h30
aug 19,1987 7h19m45.2s / 8h19m 0.2s
SVs : 6 8 11 12 13



NOISE
46 0.0000'N 3 50.0000'E5000.00m
Mob : VICH/Creil 4.0 4001
3D+T R D 50 3
Cal: 0.00-0.31 1.71 0.26-2.49 7h 0
0.00-0.51 1.08-0.02-2.66 8h30
aug 20,1987 7h14m45.2s / 8h 5m 0.2s
SVs : 6 8 11 12 13

Figure 17

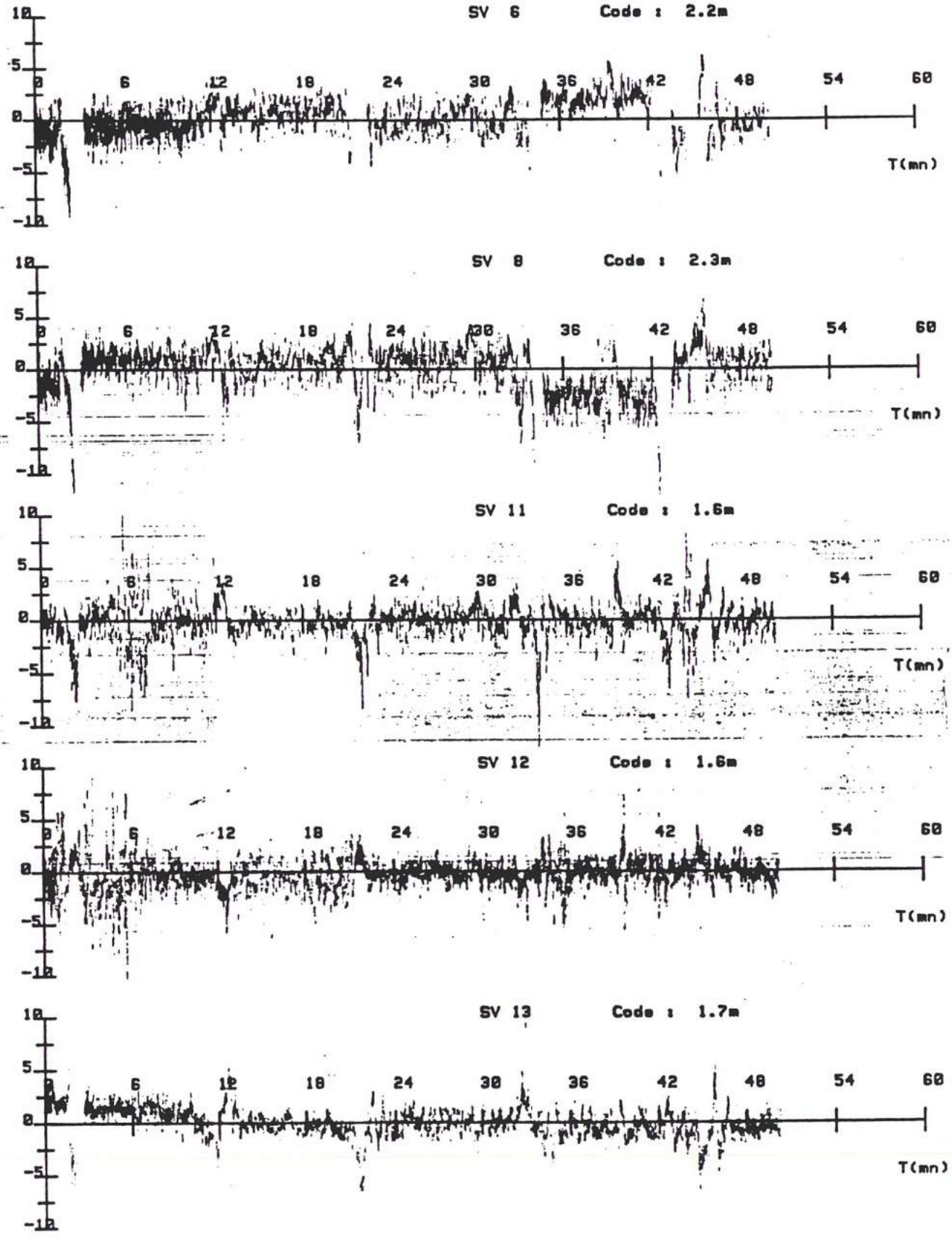
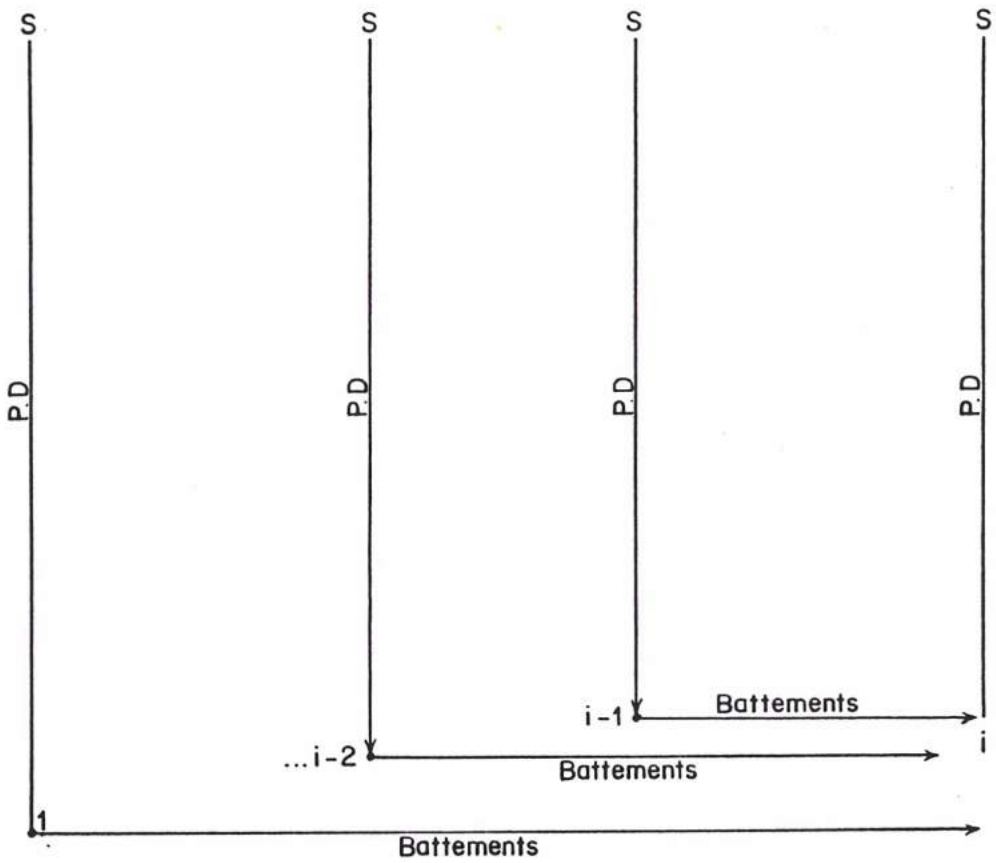


Figure 18



12.
UTILISATION DU SYSTEME DE POSITIONNEMENT GLOBAL (G.P.S.) EN CONFIGURATION DEGRADEE AIDE PAR UN CAPTEUR DE PRESSION

12.1. GENERALITES ET DEFINITION

On désigne ainsi l'utilisation de G.P.S. lorsque les satellites étaient disposés de telle sorte que la G.D.O.P, dilution géométrique de la précision, était très élevée, pour des raisons diverses: Soit que les quatre ou cinq satellites reçus étaient très bas sur l'horizon, soit, le plus souvent, qu'il n'était possible de recevoir, simultanémment, que trois satellites.

Dans ce dernier cas une détermination dite en 3D+T n'était plus possible, sauf à remplacer l'horloge du récepteur par une horloge au cesium pour faire un transport de temps entre la période de réception normale sur quatre ou cinq satellites à la période de réception en configuration dégradée, la conservation du temps étant meilleure, il serait alors possible d'éliminer l'inconnue T qui serait prise égale à la valeur qu'elle avait avant la perte de réception, ou mieux, en interpolant le biais d'horloge entre des observations encadrant une perte de réception; toutefois il était de nombreuses circonstances dans lesquelles la détermination en 2D+T restait, encore, très convenable.

On appelle H.D.O.P la dilution géométrique de la précision pour les coordonnées horizontales; lorsque sa valeur reste compatible avec la précision du travail envisagé, il semble possible de combiner l'exploitation <u>simultanée</u> de G.P.S et du Statoscope.

Pour la navigation, cette idée est dûe à [63 B.A. STEIN] qui a montré que même lorsque la constellation des satellites sera complète il se présentera, en certains points, des périodes pendant lesquelles les résultats seront mauvais, il a proposé de s'aider de mesures faites à l'aide d'un altimètre, pour améliorer la géométrie de la détermination de la position, en n'utilisant que les satellites les mieux placés.

Il a montré comment choisir les satellites qui remplissent ces conditions et fait une comparaison entre le calcul direct de G.D.O.P et la recherche du volume maximum du tétraèdre construit à partir d'un premier sommet constitué par le point à déterminer d'où rayonnent des arêtes dont les coordonnées des extrémités sont égales aux cosinus directeurs des droites joignant le récepteur G.P.S. aux quatre satellites les mieux placés, observés simultanément.

Dans la proposition de cet auteur, le plan horizon-

tal remplace un satellite manquant qui serait situé à la verticale du lieu de l'observation ou au centre de la terre, cette arête aurait 0,0,et 1 ou 0,0,et -1 pour cosinus directeurs locaux.

Le rapport entre les précisions de la mesure des pseudo-distances et du statoscope serait prises en compte.

On remarque alors, immédiatement, que cet artifice s'applique très bien lorsque tous les satellites disponibles sont bas sur l'horizon. La détermination des coordonnées horizontales serait très bonne, lorsqu'on disposerait d'un plan sur lequel s'intersecteraient les mesures de longueurs provenant des différents satellites situés dans ce plan, ou au voisinage de ce plan qui ne présenteraient aucun intérêt pour une détermination 3D+T normale, et qui deviendraient utilisables, associées aux mesures d'un capteur de pression, en outre, la précision altimétrique ne dépendrait plus que de la précision de la mesure statoscope.

C'est surtout afin d'économiser la stéréopréparation au sol, qui est une opération longue et coûteuse, qu'on a procédé par simulation à partir des mesures de LUNEL et de VICHY et à l'exploitation des mesures G.P.S. d'ALBERTVILLE où elle avait été faite par M.F.BOLDO pour les besoins de la production, enfin on a assuré la stéreopréparation du chantier de MANOSQUE observé dans des conditions meilleures qu'à ALBERTVILLE afin d'enrichir l'expérience réalisée et de pouvoir en tirer des conclusions valables.

La procédure de calcul pourrait être différente de celle qui serait utilisée dans la réalité, mais les résultats seraient sensiblement les mêmes, toutefois celà n'était pas certain comme on va le montrer.

12.2.MODELISATION DES MESURES ET DERIVES DES PARAMETRES DE TRANSLATION.

L'étude détaillée des mesures faites au sol en configuration dégradée montre que la dérive des constantes dans le temps devient beaucoup plus rapide, par conséquent, il ne serait plus possible de l'ignorer.

Dans le cas normal les dérives qu'on a observées étaient telles qu'on pouvait les négliger, certains auteurs ont publié des résultats tels que, dans des circonstances semblables, on n'aurait pas pu se passer de les prendre en compte [61 FRIESS,62 LINDENBERGER] . D'après P .FRIESS sur des essais de G.P.S effectués en 1987 en Hollande, dans des conditions comparables à celles d'AMIENS sauf que les points d'appui utilisés étaient balisés et de très bonne qualité, il aurait été relevé des dérives variant de 0 à 6mm/sec sur les trois coordonnées.

Placé dans les mêmes conditions, sur une durée de prise de vue de l'ordre de 5 minutes par bandes, une dérive de 6mm/sec aurait entraîné, entre le début et la fin de la bande, un écart de 1,80m, quantité qu'on aurait été obligé de prendre en compte dans le modèle fonctionnel, on se reportera aux valeurs des translations données pour les deux vols d'AMIENS.

Cette remarque serait encore plus vraie pour les essais décrits par DORRER et SHWIERTZ [60] qui annoncent des dérives de:

0,38m/sec en X; 0,23m/sec en Y et 0,02 m par sec en Z !

Dans des cas semblables les mesures G.P.S.seraient vraiment d'un piètre secours, autant mesurer une distance avec un métre élastique, même si on en connaissait le coefficient d'élasticité !

A la suite des vols de LUNEL et de VICHY le S.A.A avait procédé à des essais de navigation en configuration dite dégradée, en continuant la réception sur les points fixes de CREIL et de NANTES. On avait pu disposer de l'ensemble des résultats de CREIL, qu'il nous avait communiqués, leur exploitation avait montré que la dégradation attendue portait sur l'ensemble des trois coordonnées, l'altimètrie n'étant pas la seule qui était dégradée, même si c'était la plus touchée.

Mais pour l'essentiel, en situation dégradée , il faudrait, impérativement, dans les cas les plus graves , prendre en compte les dérives, dans le temps, des constantes de translation.

12.3. DESIGNATION DES CHANTIERS UTILISES ET TRAITEMENT DES INFORMATIONS.

12.3.1. SIMULATIONS

Les simulations étaient rendues absolumment nécessaires par ce que le logiciel utilisé par la SERCEL impose pour calculer les positions des sommets perspectifs en planimétrie seulement de disposer d'une estimation assez précise de l'altitude. Or dans les deux cas réels, c'est-à-dire ALBERTVILLE et MANOSQUE, l'altitude entrée dans les calculs en cours du vol était assez éloignée de la réalité et l'erreur commise se répercute sur les positions planimétriques calculées.

Par contre à LUNEL et à VICHY les positions planimétriques n'étaient pas entâchées d'erreurs provenant d'une mauvaise appréciation de l'altitude.

On se reportera donc aux annexes correspondantes pour trouver la description des chantiers de LUNEL et VICHY.

12.3.2. VOLS REELS

On trouvera, également, en annexe, pour ALBERTVILLE et MANOSQUE, la description de ces chantiers qui ont déjà servi aux recherches sur la précision des capteurs de pression.

Le chantier de LUNEL qui était le plus proche de la réalité pratique a été plus largement développé dans ce chapitre parce qu'il est unique et assez représentatif des cas qui pourraient être traîtés de cette manière.

12.4. CALCULS D'AEROTRIANGULATION DES BLOCS APPUYES SUR DE NOMBREUX POINTS AU SOL.

Ces calculs sont largement détaillés en annexe on e fera qu'en donner ici un résumé des résultats les plus significatifs:

Ecarts-types sur les points de vérification			
CHANTIERS	X	Y	Z
Lunel	0,75	0,75	0,43
Vichy	0,55	0,59	0,43
Manosque	0,90	0,81	0,55
Albertville	1,02	0,85	0,80

12.5. LES RESULTATS EN CONFIGURATION DEGRADEE.

12.5.1. SIMULATION SUR LE CHANTIER DE LUNEL.

Sur le chantier de LUNEL on avait dépouillé les mesures des coordonnées des sommets des altitudes données par le récepteur G.P.S., et on avait mis en oeuvre, conjointement, les mesures du statoscope CROUZET 44. Un point d'appui fictif au centre du bloc simulait des mesures G.P.S. qui auraient pu être faites sur le site ou un point d'appui unique balisé.

Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux points G.P.S:

r_x = 0,45m
r_y = 0,26m

Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux points statoscope:

r_z = 1,01m

Ecarts moyens quadratiques aux points de contrôle:

ϵ_x = 0,92m au lieu de 0,75m
ϵ_y = 0,89m au lieu de 0,75m
ϵ_z = **1,22m** ; le biais étant nul les écarts-types étaient identiques, au lieu de **0,43m**

Ces résultats sont reportés graphiquement sur le plan au 1/200.000ème de la figure 19. Il était intéressant de comparer les résultats obtenus au niveau des résidus sur chaque point de contrôle en configuration dégradée et en trajectographie. la figure 20 retrace les résultats de cette comparaison.

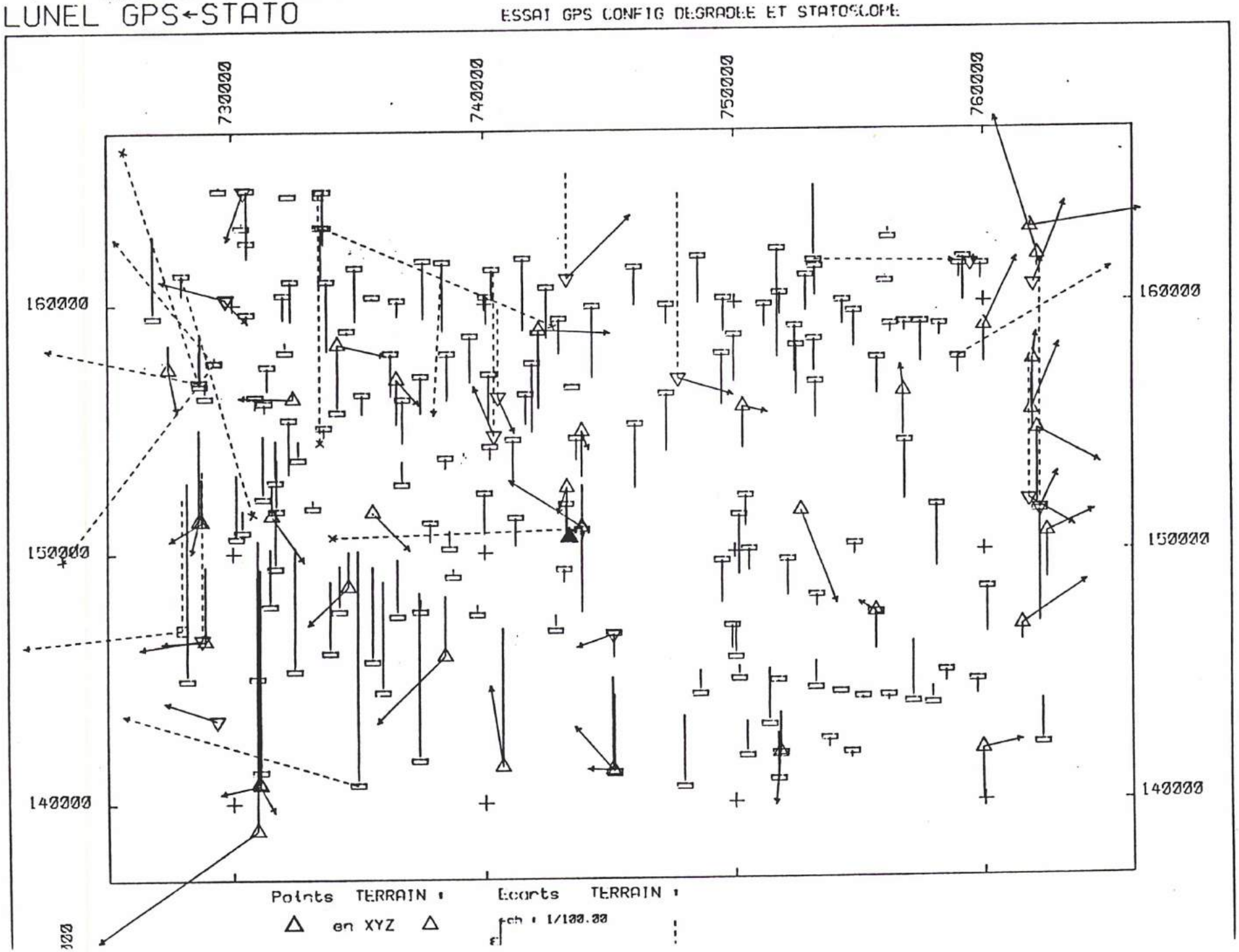

LUNEL GPS←STATO
ESSAI GPS CONFIG DEGRADEE ET STATOSCOPE
730000
740000
750000
760000
160000
150000
140000
Points TERRAIN :
en XYZ
Ecarts TERRAIN :
ech : 1/100.00

Figure 19

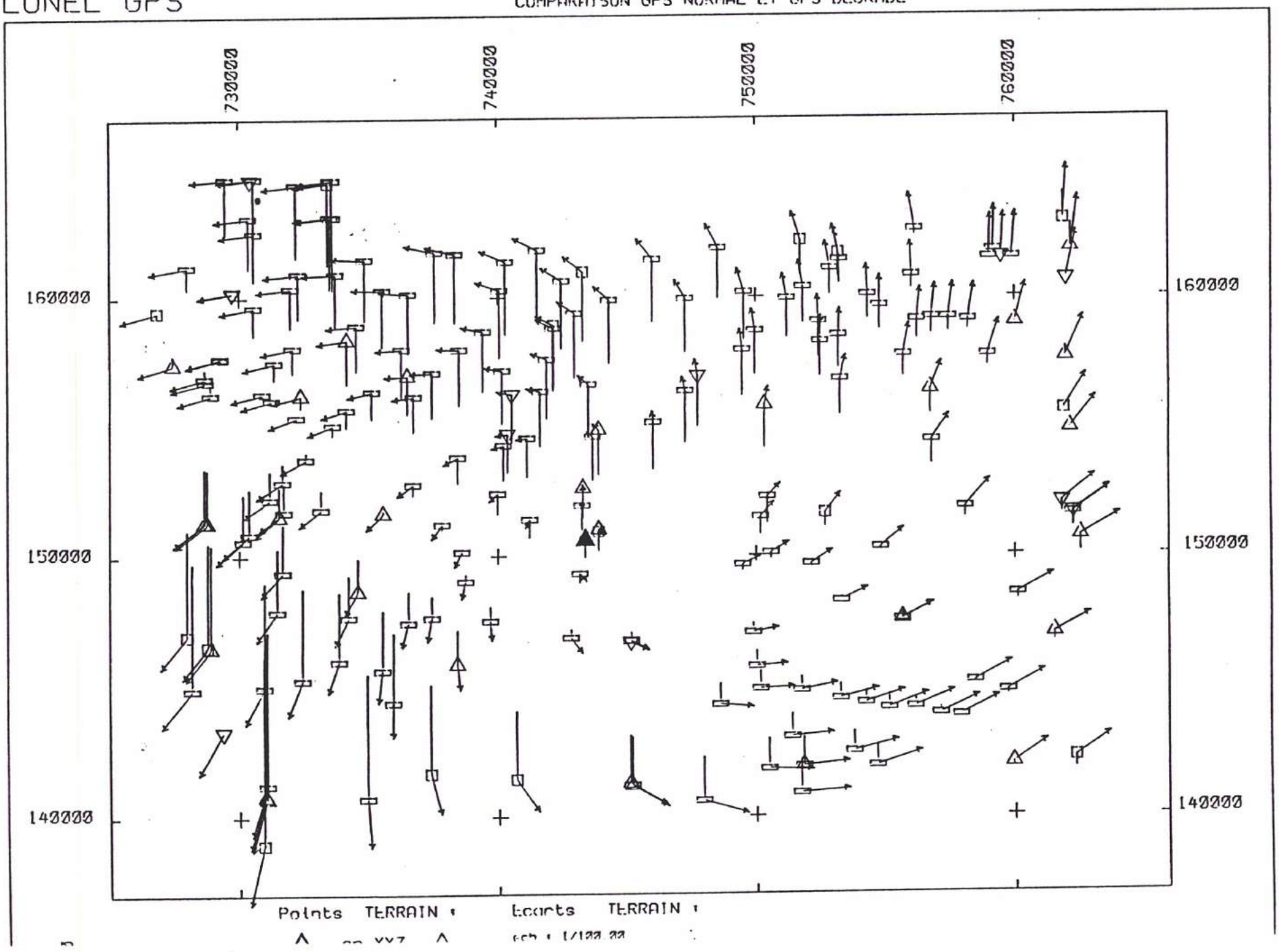

LUNEL GPS
COMPARAISON GPS NORMAL ET GPS DEGRADE
730000
740000
750000
760000
160000
150000
140000
Points TERRAIN :
Ecarts TERRAIN :

Figure 20

On remarquera surtout que les erreurs en altimétrie entraînent, par effet de liaison entre les coordonnées des sommets et celles des points au sol, des erreurs en planimétrie très spectaculaires, ce phènomène est l'objet de [l'ANNEXE VII-A].

12.5.2. SIMULATION SUR VICHY.

Dans des conditions absolument semblables on avait obtenu, à VICHY:

Résidus moyens quadratiques d'ajustement sur les coordonnées planimétriques des sommets déterminées par G.P.S:

$r_x = 0,29m$
$r_y = 0,31m$

Résidus moyens quadratiques d'ajustement sur les altitudes des sommets déterminées par le statoscope

$r_z = 1,08m$

Ecarts moyens quadratiques aux points de contrôle:
$\epsilon_x = 0,50m$ au lieu de $0,55m$
$\epsilon_y = 0,72m$ au lieu de $0,59m$
$\epsilon_z = 1,02m$ au lieu de $0,43m$

Ces résultats étaient tout à fait comparables. Ils montraient qu'il était possible de travailler en configuration dégradée pour autant que la " dilution horizontale de la précision" H.D.O.P. reste convenable et que les mesures des capteurs de pression soient correctes, ce qui était le cas dans les deux exemples qu'on vient de présenter.

Sur le plan au 1/200.000ème de la figure 21 on a reporté les écarts aux points de contrôle entre les déterminations du terrain et celles obtenues à l'aide des données G.P.S. dégradées et les mesures d'altimétrie des statoscopes.

Sur la figure 22 on a fait la comparaison entre les résultats obtenus à l'aide de G.P.S. seul et de G.P.S en configuration dégradée aidé par les mesures des statoscopes. On peut faire les mêmes constatations qu'à LUNEL.

On a ensuite essayé d'exploiter les mesures faites à ALBERTVILLE le même jour qu'à VICHY, mais beaucoup plus tard dans la journée.

On avait adopté, pour la détermination des altitudes absolues, le modèle linéaire du capteur de pression, obtenu à VICHY quelques heures plus tôt.

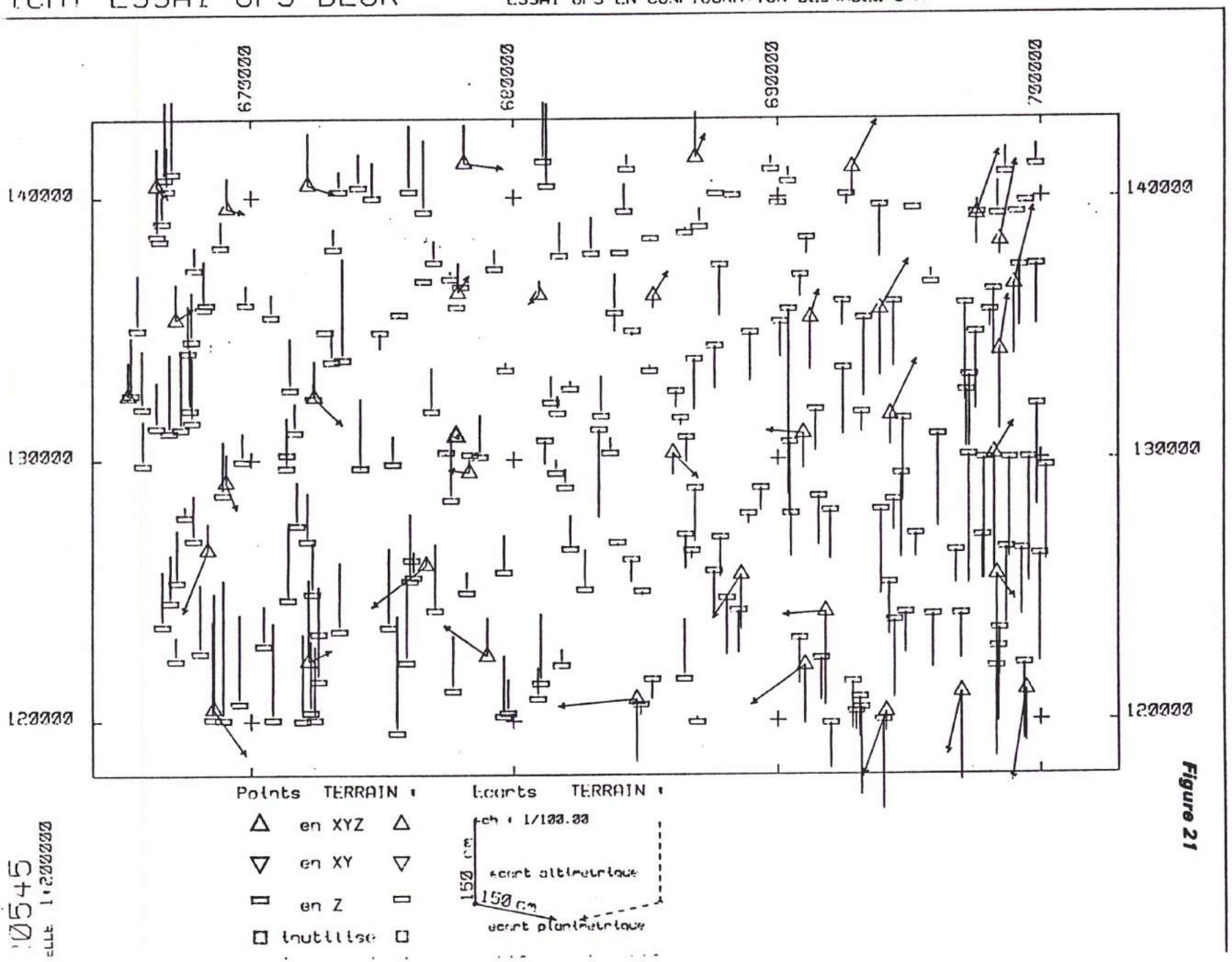

ICHY ESSAI GPS DEGR
ESSAI GPS EN CONFIGURATION DEGRADEE+STAT
670000
680000
690000
700000
140000
130000
120000
Points TERRAIN :
en XYZ
en XY
en Z
inutilisé
Ecarts TERRAIN :
éch : 1/100.00
150 cm
écart altimétrique
150 cm
écart planimétrique

Figure 21

ICHY ESSAIS GPS

COMPARAISON GPS DEGR +STATO ET GPS SEUL

670000 680000 690000 700000

140000 130000 120000

Points TERRAIN : Ecarts TERRAIN :

en XYZ

en XY

en Z

inutilise

ech : 1/100.00

150 cm écart altimetrique

150 cm écart planimetrique

appui controle actif inactif

20545

ECHELLE 1:200000

Figure 22

12.5.3. RESULTATS DE L'ESSAI FAIT SUR LE BLOC D'ALBERTVILLE.

Ce vol avait eu lieu le 20 Août 1987 entre 13h24 et 14h02 ; on observait trois satellites, mais dès la quatrième bande le satellite (Space Vehicule) SV 13 passait sous la limite de 5° de hauteur au-dessus de l'horizon, sur la cinquième bande il passait de 2° à 1° et la réception cessait. Les conditions étaient donc très dégradées, même pour une détermination de la position en 2D+T !

Les figures 23 portant la N.D.O.P. et la E.D.O.P. et 24 portant les azimuts et les hauteurs au-dessus de l'horizon des satellites observés indiquent les raisons de la très mauvaise qualité des résultats en planimétrie:

Les deux satellites SV12 et SV13 avaient, approximativement, le même azimut d'environ 15° et une hauteur variant de 15 à 5°, pour l'un, et de 10 à 3°, pour l'autre, pendant le cours du vol; le SV3 avait un azimuth de 140° et une hauteur variant de 65 à 50° pendant le même temps; la détermination des abscisses était évidemment mauvaise, et celle des ordonnées un peu meilleure, car les corrections de réfraction etaient moins fortes, et mieux connues pour une hauteur de 50°, qu'en vue rasante sur l'horizon, l'épaisseur des couches traversées par les ondes électromagnétiques était alors maximum, comme l'était l'indétermination des paramètres de calcul des corrections de réfraction qui pouvait atteindre 80m sur la pseudo-distance !

Le bloc d'ALBERTVILLE étant, hélas, un bloc normal, bien que des bandes transversales le long des vallées aient été observées, elles avaient été exploitées à notre demande mais leur présence n'avait pas permis de le rendre homogène, car il restait déformable transversalement, ce qui avait démontré que la présence de bandes presque transversales n'était pas suffisante, il aurait fallu qu'elles soient parfaitement perpendiculaires au sens du vol et placées exactement aux deux extrémités, il n'était donc pas possible de l'appuyer sur un seul point central sans dégrader l'altimétrie, non par manque de précision des capteurs de pression, mais par manque de rigidité transversale du bloc; lequel avait dû être appuyé sur un point central connu dans ses trois coordonnées, comme pour VICHY et LUNEL, et par des points d'appui altimétriques, situés dans les parties communes à deux bandes adjacentes, voir la configuration minimale des points d'appui dans le cas du bloc normal, exposée plus haut.

La configuration des appuis était donc minimale et on se retrouvait placés dans une situation comparable, du point de vue des appuis, aux deux cas précédents.

Dans ces conditions les résultats avaient été les suivants:

Résidus moyens quadratiques d'ajustement sur les coordonnées planimétriques des sommets perspectifs par G.P.S.:

r_x = 5,30m
r_y = 1,46m

Week 397 aug 20,1987 at 45°42' 0.000"N 6° 8' 0.000"E 6000.00m (ALBERTVILL)
Week 398 Almanachs; Ev min: 0

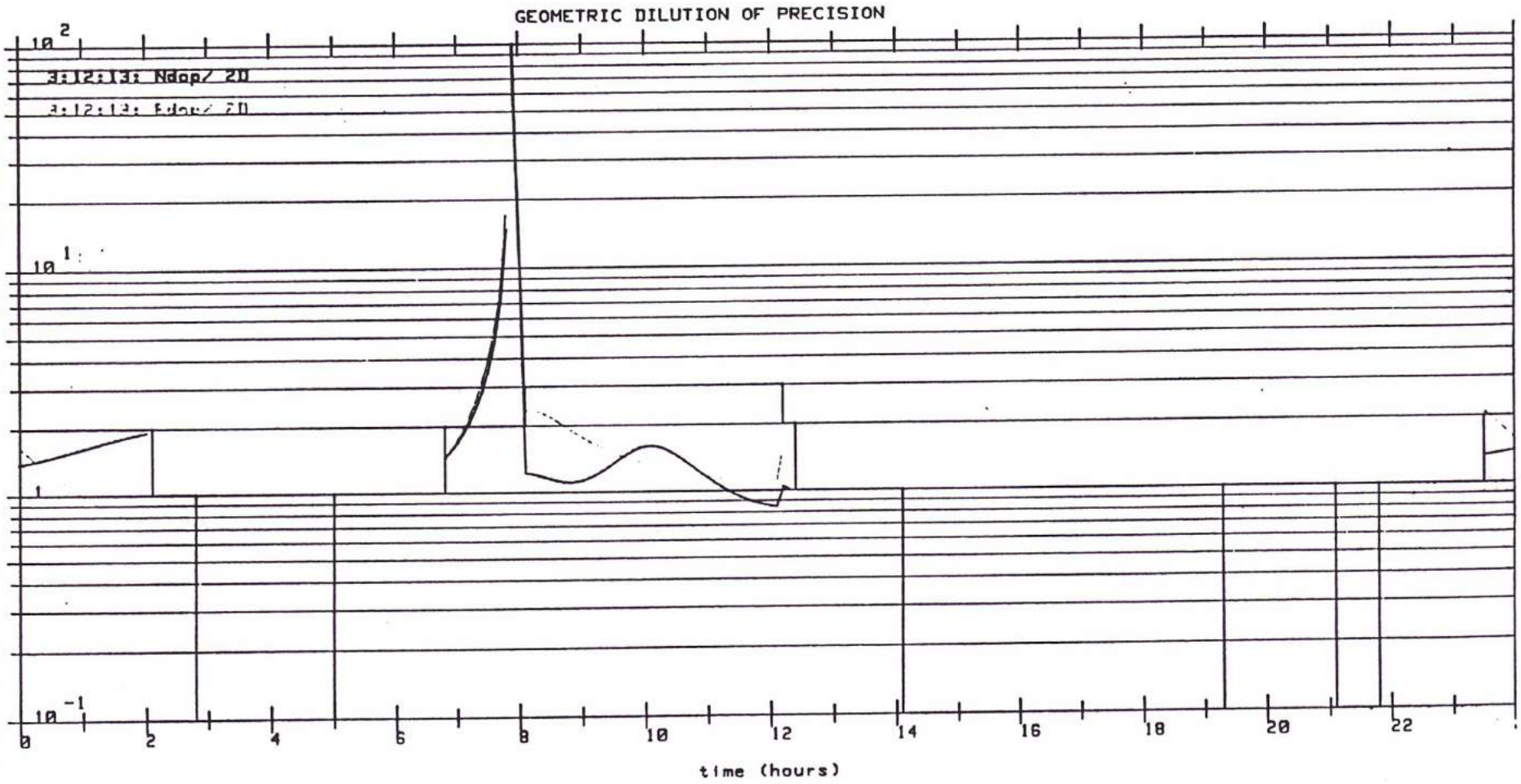


Figure 23

Week 397 aug 20,1987 at 45°42' 0.000"N 6° 8' 0.000"E 6000.00m (ALBERTVILL)
Week 398 Almanachs; Ev min: 0

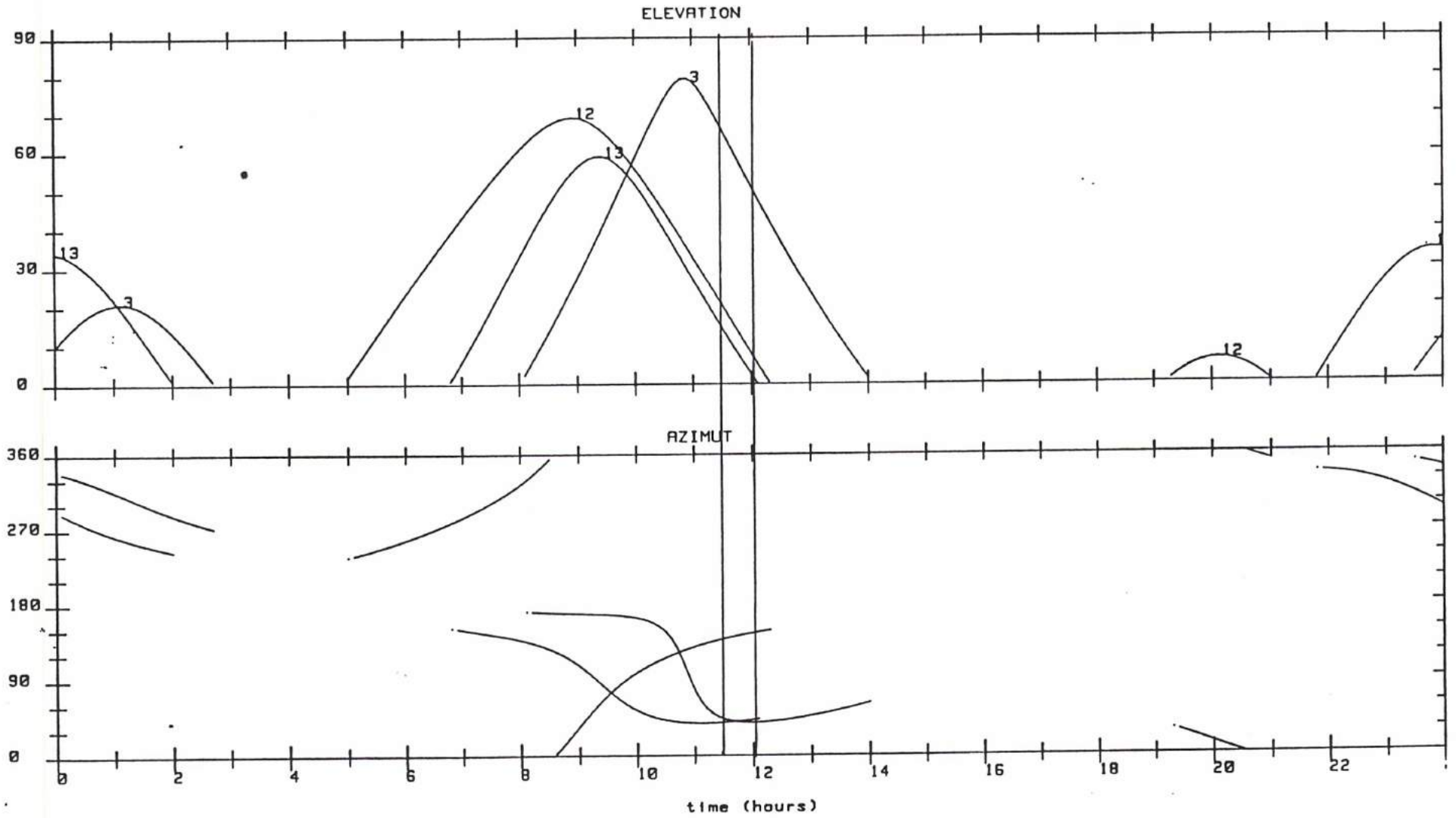


Figure 24

Résidus moyens quadratiques d'ajustement sur les mesures d'altitude des capteurs de pression:

r_z = 0,97m
r_z = 1,05m

Ecarts moyens quadratiques sur les points de contrôle, écarts moyens arithmétiques, écarts-types:

			Au lieu de
ϵ_x =4,71m	b_x =-1,43m	σ_x = 4,49m	1,02m
ϵ_y =3,32m	b_y = 0,47m	σ_y = 3,29m	0,85m
ϵ_z =1,12m	b_z = 0,34m	σ_z = 1,07m	0,80m

Bien entendu ce bloc ne saurait être choisi comme modèle du genre, toutefois, les mauvaises déterminations planimétriques ne gênaient en rien l'obtention d'une bonne qualité du bloc en altimétrie; dans le cas présenté ici, contrairement aux deux qui l'avaient précédé, on constatait une assez faible dépendance des déterminations planimétriques et altimétriques parce que les erreurs sur ces dernières sont assez faibles, ce qui permettrait d'espérer, du travail conjugué du récepteur G.P.S. et du capteur de pression, des résultats bien meilleurs que ceux obtenus sur ce dernier bloc.

La figure 25 est un plan portant la comparaison, qui avait été faite, des coordonnées des points de contrôle, mesurées sur le terrain, et des coordonnées des mêmes points, obtenues par la photogrammétrie appuyée sur des points G.P.S, calculés en configuration dégradée, aidés par des mesures statoscope, et sur quelques points d'appui, pochés sur le plan, en nombre minimum pour un bloc normal.

La figure 26 compare les résultats obtenus par l'aérotriangulation classique et le bloc appuyé sur les points G.P.S en configuration dégradée, pour l'altimétrie seulement.

12.5.4. LES RESULTATS SUR LE BLOC DE MANOSQUE.

Comme dans les expériences précédentes on avait calculé le bloc appuyé sur tous les points connus disponibles et sorti les écarts quadratiques moyens sur les mesures aéroportées qui ne participaient pas encore à la compensation.

On avait obtenu sur G.P.S en configuration dégradée:

E m q en X = 1,19m
en Y = 0,87m

Puis sur les deux statoscopes:

Crouzet 44 Emq en Z = 1,51m
2500 Emq en Z = 1,51m

En planimétrie les résultats étaient bien meilleurs qu'à ALBERTVILLE, ce qui était attendu puisque les positions des

ALBERTVILLE GPS+STAT

COMPARAISON GPS DEGRADE+STA ET TERRAIN

900000

910000

920000

90000

80000

70000

Points TERRAIN :

en XYZ

en XY

Ecarts TERRAIN :

ech : 1/100.00

Ecart altimetrique

Figure 25

ALBERTVILLE GPS+STAT
COMPARAISON AERO CLASSIQUE ET GPS DEGRAD
900000
910000
920000
90000
80000
70000
Points TERRAIN :
en XYZ
en XY
Ecarts TERRAIN :
ech : 1/100.00
ecart altimetrique

Figure 26

satellites étaient nettement plus favorable par contre inexplicablement les mesures statoscopes étaient moins bonnes.

12.5.4.1. CONFIGURATION MINIMALE DES APPUIS SANS LES MESURES AEROPORTEES

On a ensuite fait intervenir les mesures aéroportées dans une compensation où l'on a retiré le maximum de points d'appui. Le bloc de MANOSQUE étant, hélas, normal il n'a pas été possible, pour obtenir des résultats ayant un sens en altimétrie de retirer tous les points d'appui sauf un.

Afin de bien apprécier l'apport des mesures aéroportées on a appuyé le bloc sur une configuration minimale comprenant deux appuis en planimétrie ce qui est le minimum requis pour appuyer un bloc dans le plan et dix appuis en altimétrie très bien répartis.

Bien entendu les résidus moyens quadratiques d'ajustement étaient nuls en planimétrie puisqu'il n'y avait aucune redondance dans le plan et, en altimétrie on avait:

Rmq =0,64m

Les écarts sur les points de contrôle étaient les suivants:

Emq	Ecart moyen	Ecart-type
X = 1,33m	0,23m	1,31m
Y = 1,14m	-0,42m	1,06m
Z = 2,72m	-1,33m	2,37m

12.5.4.2. BLOC APPUYE SUR LES MESURES AEROPORTEES.

On a ensuite appuyé le bloc sur un (1) ou deux (2) points d'appuis en planimétrie, les mêmes que ceux utilisés au paragraphe précédent et sur, seulement six (6) points en altimétrie au lieu de dix. Les écarts sur les points de contrôle étaient les suivants:

Emq		Ecart moyen		Ecart-type	
Plani:1 appui	2appuis	1	2	1	2
X = 1,38	1,35	0,17	-0,24	1,37	1,35
Y = 1,29	1,09	-0,63	-0,39	1,13	1,09
Z = 1,20	0,93	0,57	0,02	1,08	0,93

On note que l'amélioration porte surtout sur l'altimétrie, et que la présence de deux points d'appui planimétriques ne change que peu de chose aux résultats, mais évidement il est maintenant possible de s'appuyer sur un seul point en planimétrie alors que ce n'était pas le cas sur le bloc de comparaison. En outre la diminution du nombre de points d'appuis en altimétrie

est compensée par l'apport des mesures aéroportées.

Dans le même calcul les résidus moyens quadratiques d'ajustement, donnés avec toutes les réserves qui s'imposent sur leur signification, sur les mesures aéroportées étaient:

	G.P.S.	
	Un appui plani	Deux appuis plani
En X	0,88m	0,87m
En Y	0,56m	0,56m
	Capteurs de pression	
Crouzet 2500	1,31m	1,33m
44	1,36m	1,27m

12.6. RESUME DES RESULTATS

On peut résumer comme suit les résultats obtenus en combinant des mesures G.P.S sur une constellation dégradée et les mesures des capteurs de pression.

Ecarts-types sur les points de vérification

Chantier	Réseau complet d'appuis au sol	Réseau réduit d'appuis et mesures G.P.S et pression combinées
Albertville	X-Y = 0,90 Z = 0,80	1,05 1,00
Manosque	X-Y = 0,90 Z = 0,70	1,20 1,00
Vichy	X-Y = 0,55 Z = 0,45	0,65 1,00
Lunel	X-Y = 0,75 Z = 0,45	0,90 1,20

On remarquera, à nouveau, que les résultats sont arrondis aux 5 cm les plus proches.

13.
CONCLUSIONS.

13.1.GENERALITES.

Il pourrait sembler vain de vouloir conclure sur un aussi vaste sujet à la suite d'une étude qui sera probablement dépassée dès qu'elle sera publiée, tant les choses vont vite en ce domaine.

Il ne s'agira donc que de faire le bilan des points acquis pendant ces trois dernières années et d'éclairer l'avenir proche.

D'une façon générale, que ce soit pour les mesures laser et même les mesures statoscope, il reste de gros progrès à faire sur le matériel ou l'enregistrement. Il est certain que la qualité des mesures laser dépendra, non seulement des performances du matériel employé, mais aussi des qualités de l'identification du point touché. Toutefois les publications étrangères font état de résultats moins pessimistes sur ce procédé de mesure. Dans le même ordre d'idées les défaillances partielles du capteur de pression devront être corrigées. Il existe donc des progrès considérables à faire en matière de capteurs et de mesures.

Inversement, les résultats donnés par le récepteur NAVSTAR G.P.S TR5-S.B de SERCEL sont tout à fait remarquables par leur fiabilité. Toutefois il ne faudrait pas oublier les conditions dans lesquelles ces résultats ont été obtenus: ce n'est que par trajectographie que les résultats sont totalement fiables, c'est-à-dire en utilisant deux récepteurs, simultanémment, dont l'un reste à poste fixe au "voisinage" du chantier.

Sans cette précaution les coordonnées G.P.S ne sauraient être garanties comme ne présentant aucune faute, surtout pendant les périodes pendant lesquelles la G.D.O.P.évolue rapidement.

13.2.LES MESURES LASER.

On a déjà donné au cours de cette étude les conditions à partir desquelles les essais pourraient être poursuivis.

De toutes les façons qu'on considère le problème, les mesures laser, même bien faites, bien enregistrées, et fiables intrinsèquement, ne pourraient exprimer leurs qualités qu'au-dessus des terrains nus, pas trop accidentés, la végétation, les constructions, la pente, sont autant d'obstacles à une bonne identification du point frappé par l'éclair laser; cette identification reste la clef de voûte, fragile, du système : Le défaut de la mesure laser sera toujours de s'attacher à n'importe quel point, or un point photogrammétrique correct qui serait un bon réflecteur laser ne sera jamais n'importe quel point, il doit posséder de nombreuses qualités, que le seul hasard ne saurait lui apporter.

Quels que puissent être les progrès dans la technologie de la mesure, on se heurtera toujours à ce facteur limitant fondamental.

13.3. LES MESURES DES CAPTEURS DE PRESSION ATMOSPHERIQUE (STATOSCOPES).

On a été très étonné de trouver dans la littérature française et étrangère tant de résultats divergents concernant la précision qu'on pouvait attendre des mesures de ces appareils. Il semble bien que les explications puissent être trouvée dans deux directions:

1°/ Les modèles stochastiques incorrects, on a largement développé ce point, on ne reviendra pas dessus.

2°/ Les conditions atmosphériques, ce point est beaucoup plus grave, car on ne voit pas comment il serait possible de prévoir la précision qui pourrait être attendue en dehors de connaissances météorologiques qui ne sont pas de la compétence du photogrammètre.

Toutefois les conditions météorologiques, au cours desquelles les prises de vues sont faites, sont toujours à peu près les mêmes. Les essais qu'on a faits sont assez nombreux pour avoir, déjà une estimation correcte de la précision de la mesure qui est comprise entre 0,70m à 1,80m en écart-type .

13.4.LES MESURES DES COORDONNEES DES SOMMETS PERSPECTIFS PAR UN RECEPTEUR G.P.S. AEROPORTE.

La conclusion sera faite en forme de projet pour les prochains essais:

Il serait, en effet, souhaitable de ne pas perdre de temps en matière d'expérimentation pour se, décider à entreprendre des essais sur un ou des chantiers à grande échelle.

Il faut bien avouer que les chantiers d'AMIENS auraient pu apporter, sans coût supplémentaire, une moisson de renseignements précieux si le polygone d'essai avait été balisé c'est-à-dire si les points d'appui avaient été d'une précision adaptée à l'échelle de prise de vue.

De plus, il paraît que tous les pays étrangers, ou presque, utilisent couramment, depuis 1977, des blocs homogènes.

Enfin il faudra bien parvenir à faire fonctionner sur le chantier un récepteur fixe synchronisé avec celui de l'avion photographe.

Ces conditions étant remplies il faudrait entreprendre, au plus vite, la prise de vue d'un chantier balisé à grande échelle, le bloc serait, évidemment, homogène, et un récepteur sera implanté sur le chantier. Si la précision de la mesures de l'instant de la prise de vue est suffisante et si on ne relève pas trop d'interruptions de réception il sera nécessaire de changer de logiciel et d'adopter les calculs dits "cinématiques" dont les résultats sont indépendants de la précision de la mesure des pseudo-distances.

Les inconnues sont alors, en plus des coordonnées des points à déterminer, les ambiguïtés, c'est-à-dire que le nombre entier de cycle n'est pas connu. Il serait, alors, possible de descendre en-dessous d'un écart-type d'un décimètre sur les points de contrôle ou, au moins, d'approcher cette valeur.

De toutes les manières, et pour toute échelle que ce soit, cette voie sera à explorer si le Ministère de la Défense américain bruite les pseudo-distances et les messages sur les positions des satellites comme cela est prévu au cas où les civils, et les adversaires potentiels, feraient trop de progrès en matière de précision du positionnement en temps réel.

13.5.LES MESURES COMBINEES.

Il est facile d'imaginer les différentes combinaisons de mesures aéroportées qui pourraient en être faites.

On a déjà montré ce que donneraient des mesures des coordonnées des sommets perspectifs par G.P.S incomplètes associées à celles d'un capteur de pression.

Ceci permettrait d'anticiper ce que donneraient des mesures G.P.S. associées à des mesures laser sur des sols nus, si l'appareil de mesure était à la hauteur de ceux décrits dans les expériences Américaines et Canadiennes, qu'on a largement évoquées dans le texte, indépendamment de toute mesure photogrammétrique, pour dresser des profils de terrains sans avoir à les parcourir.

Dans les zones désertiques, la combinaison des mesures simultanées photogrammétriques laser et capteur de pression, rappelant le système A.P.R actuel, permettrait d'appuyer correctement des prises de vues au 1/30.000ème, avec une précision comparable à celle qu'on obtient avec de très nombreux points au sol, l'équivalence qu'on a pu constater, à cette échelle, serait de deux points au sol connus en altimétrie par cliché.

13.6. LES MODELES DES MESURES AEROPORTEES.

On a vu que plus le modèle était simple plus il était "robuste", et plus la mesure était "efficace": il ne viendrait à l'idée de personne de mesurer des longueurs, avec un mètre élastique, même si on connaissait parfaitement sa loi d'allongement, qui permettrait de considérer la traction exercée sur lui comme une inconnue supplémentaire!

Si on n'a tiré que peu de choses des mesures de hauteur par laser, c'est en raison de la présence de cette constante inconnue qui devait être ajoutée à la mesure, à cause de laquelle l'effet des mesures laser sur la transmission de l'échelle dans le bloc, n'a pas pu être mise en évidence.

Il semblait intéressant de souligner, par contre, l'intérêt essentiel des mesures directement liées aux sommets perspectifs, telles que celles des capteurs de pression et de G.P.S. qui ne soient pas liées à des points des images photographiques qui posent des problèmes d'identification et dont l'imprécision propre s'ajoute à celle de leur détermination,

comme ceux qui se posent pour les points laser, même s'il reste encore à faire pour connaitre et estimer correctement les orientations et les composantes du vecteur antenne-chambre.

Il parait immédiatement accessible d'obtenir, avec quelques bons points au sol balisés, et un récepteur G.P.S. à bord de l'avion, des résultats aussi exacts qu'avec de nombreux points balisés; c'est déjà un progrès considérable qui est à portée de la main, pourvu qu'on relève l'angle de dérive, de cabrage et d'inclinaison de l'avion, pour lesquels les mesures de la centrale d'inertie de navigation de l'avion seront, peut-être suffisantes.

Pour les capteurs de pression l'amélioration des résultats à très peu de frais, en terrains accidentés, montagneux, ou de parcours difficile, ou pour toute cause que ce soit, est un point qu'on peut considerer comme acquis.

Une difficulté subsiste dans le programme FAISCEAUX sous sa forme actuelle: suivant la nature des mesures aéroportées ou des conditions dans lesquelles elles ont été faites, des équations de conditions qu'on voudrait voir prises en compte pour toute autre cause, 1°/ d'une part il n'est pas encore possible d'introduire un modèle convenable dans les calculs sans modifier, au préalable le programme de préparation et le programme de calcul; 2°/ d'autre part les résultats ne peuvent pas être exploités normalement sur les sous-programmes et les utilitaires de la chaîne.

Jusqu'ici on avait été obligé de se contenter de quelques modèles simples, chacun d'entre eux étant associé à une version particulière du programme: dans la dernière version (7) il était possible de traiter, à la fois, les systématismes de M.DUCLOUX, les mesures d'un capteur de pression, et les "mesures" des coordonnées des sommets perspectifs par G.P.S.

Si une partie des possibilités de ce programme n'était pas utilisée, soit qu'une des catégories des mesures n'ait pas été faite (capteur de pression, ou inconnues de systématisme, ou G.P.S. par exemple) la durée du calcul n'en était pas diminuée pour autant, puisque le programme explorait tous les termes de la matrice normale, y compris ceux qui étaient nuls, car n'avant pas à être déterminés, leur position dans la matrice normale avant été réservée, automatiquement, au cours de la phase dite "de preparation" pour, éventuellement, recevoir des observations qui n'avaient pas été faites.

Compte tenu de l'augmentation considérable des temps de calcul d'un programme établi pour prendre en compte les modèles fonctionnels les plus généraux, des mesures aéroportées les plus diverses, impliquant la mise en oeuvre de nombreux paramètres, en raison, notamment, des relations de voisinage entre les sommets perspectifs créées par ces paramètres, on a pensé qu'un programme rendu "universel" par ce moyen, c'est-à-dire pouvant répondre à tous les cas susceptibles d'être rencontrés, n'aurait aucune chance d'être utilisé autrement que dans des cas très particuliers c'est-à-dire très rarement, car les temps de calcul deviendraient vite prohibitifs.

Il semble pourtant que ce problème ait été résolu à l'étranger (programme BINGO notamment).

Si une solution devait être trouvée, elle se situerait dans le programme dit de "préparation" de FAISCEAUX

dans lequel on devrait pouvoir entrer un modèle convenable pour chaque cas à traiter, qui n'entrainerait pas d'augmentation du temps de calcul, par la prise en compte de relations qui, de toutes façons, n'existent pas.

En outre, ce problème resterait lié à celui du traitement des pivots nuls, rencontrés au cours de la résolution du système, s'il n'était pas possible de faire autrement que d'abandonner un certain nombre d'inconnues de la matrice normale, dont les pivots seraient nécessairement nuls. On a vu que la solution apportée est assez rustique; il sera possible d'apporter une solution satisfaisante, de toutes façons plus élégante que ce qui s'est fait jusqu'ici.

13.7.LA PONDERATION DES MESURES HETEROGENES BIAISEES.

Les méthodes qu'on a utilisées ne sont pas entièrement satisfaisantes non plus, pas seulement en raison de la présence de systématismes.

Le problème de la pondération des mesures hétérogènes non biaisées est actuellement étudié sous la direction de M Ph.HOTTIER, les premiers résultats seraient très encourageants.

Il restera ensuite à traiter le cas des mesures hétérogènes biaisées, lorsqu'on ne connait pas le modèle fonctionnel des systématismes présents dans les mesures.

Il semblerait, qu'à l'étranger, le problème ait été traité, avec un certain succès, par l'adoption d'un très grand nombre de paramétres de systématismes. Il faut tout d'abord remarquer, qu'on se trouve ramené au problème traité lors du paragraphe précédent: on aura nécessairement de nombreux paramètres inutilisés, car ne s'appliquant pas à tous les cas particuliers rencontrés, on a adopté une attitude peut être trop méfiante contre les risques de la "surparamètrisation" craignant qu'elle n'entraine des couplages entre les inconnues, créant des singularités, le temps de calcul risquait aussi d'être augmenté la lecture des deux communication de H.D. HUANG [11] en est la cause. Ces craintes ne sont peut-être pas fondées. Par ailleurs, comme le philosophe des sciences KARL.R.POPPER [64] l'a souligné, une bonne théorie se caractérise par le fait qu'elle permet des prédictions qui peuvent être réfutées, il semble que certains jeux de paramètres de systématismes soient si parfaits qu'ils seraient totalement irréfutables.

Il n'en reste pas moins que le but de la recherche qu'on a présentée n'était pas d'étudier les paramètres de systématismes, par conséquent les modèles étaient ceux du programme en usage au moment où ce travail était réalisé.

La position qu'on avait adoptée se justifiait, aussi, par le fait que la "surparamètrisation" affaiblissait toujours la qualité de la mesure, surtout si elle était inutile, et, si elle était utile, cela ne pouvait indiquer que la mesure était de peu d'intérêt, en lui donnant moins de poids, et en la rendant moins robuste: En effet une faute trouverait toujours le moyen de se cacher, en modifiant un paramètre disponible capable de la "modèliser" et d'épouser n'importe quelle circonstance, la faute serait seulement masquée, et le résultat de la compensation serait, par conséquent, moins sûr.

Si une mesure, pour être utilisable, dépend de

nombreux paramètres inconnus, il est bien évident qu'elle doit intervenir avec un poids plus faible dans la compensation.

Si on lui donnait un poids fort, on pourrait rattraper cette erreur en attribuant un poids faible aux paramètres de modèlisation en donnant, par exemple, des écarts-types élevés aux équations de stabilisation, on ne ferait, par conséquent, que déplacer la "dépondération" vers les paramètres de systématisme.

Le fait d'affaiblir le poids des mesures connues pour être biaisées, même après l'intervention de paramètres de systématisme, comme on l'a fait dans la présente étude, conserverait la qualité de robustesse tout en évitant de mettre en cause les paramètres de systématisme adoptés et ce, avec très peu de moyens.

Il existe une parenté étroite entre les paramètres de systématismes des mesures des coordonnées des clichés et les modèles fonctionnels des mesures aéroportées, ces derniers pouvant être considérés comme les paramètres de systématismes de ces dernières mesures, c'était pourquoi, quelle qu'ait été la face par laquelle on abordait les problèmes, on retombait sur les mêmes difficultés, et sur les mêmes solutions a y apporter.

A l'inverse, des défauts de la "surparamètrisation" qu'on vient de souligner, des biais ou des systématismes involontaires pourraient s'introduire dans les résultats de calculs faits avec des mesures qui auraient été mal "modèlisées", ou insuffisamment "paramètrées", les traiter en diminuant leur poids, ne présenterait que des avantages, pour les mêmes raisons.

13.8. LES MESURES AEROPORTEES QU'ON N'A PAS UTILISEES

On aura remarqué dès le préambule l'absence dans ce mémoire de deux types de mesures aéroportées: les procédés de radiolocalisation de type TRIDENT de Thomson-CSF et les centrales de navigation par inertie.

13.8.1. LE PROCEDE TRIDENT.

Ce procédé met en oeuvre des balises émettrices qui doivent être implantées sur des points connus en planimétrie et en altimétrie du terrain survolé.

Des essais avaient été menés en 1985 à l'I.G.N et en 1986 par le S.H.O.M.

La principale contrainte était d'implanter ces balises sur le terrain, d'en déterminer les coordonnées, et de les surveiller. Leur nombre minimum recommandé étant de quatre.

Il était plus économique d'utiliser un système comme G.P.S pour lequel on doit, au plus, implanter un seul récepteur fixe au sol. Par ailleurs dans les essais TRIDENT cités seules les distances étaient mesurées avec une précision comparable à celle qu'on a obtenue sur les pseudo-distances de G.P.S. Il parait normal que les résultats obtenus n'aient pas été très homogènes, ceci est évident si on remarque que, contrai-

rement à G.P.S, la G.D.O.P varie très vite avec le déplacement de l'avion. Ceci est extêmement sensible sur les déterminations altimétriques, c'est probablement pourquoi les essais n'ont pas été poursuivis à l'I.G.N.

Il ont été repris, l'année suivante, par le S.H.O.M en s'aidant, cette fois, d'un capteur de pression, pour déterminer les altitudes, toutes les possibilités de ce capteur n'ont pas été exploitées, sans doute parce-que cet appareil, dont on aura remarqué les performances, était alors encore mal connu.

Il ne faudrait pas conclure trop rapidement au manque d'intérêt du principe de localisation sur lequel s'appuie ce procédé puisqu'on n'a pas encore tenté de suivre la phase de la porteuse ni exploité l'effet DOPPLER. Le même principe peut aussi être utilisé en mesurant avec un laser divergent les distances de points connus et équipés de réflecteurs au sol.

13.8.2. LES CENTRALES DE NAVIGATION A INERTIE.

Au début de cette étude en 1986 ces capteurs avaient la réputation d' être très chers voire inabordables.

Il semblerait que ce point de vue puisse être révisé en 1989. Il semblerait aussi que les centrales de navigation des avions atteindraient bientôt une précision suffisante pour que leurs mesures puissent être saisies et exploitées dans les calculs d'aérotriangulation.

Les mesures faites sont, évidemment, des accélérations: Dans la centrale du satellite SPOT elles sont intégrées dans le temps pour être transformées en vitesses,ce sont ces "mesures " qui sont introduite dans les calculs de spatiotriangulation.

Par conséquent les positions du sommet perspectif, qui sont les données les plus intéressantes, sont affectées d'erreurs dûes à la double quadrature lesquelles sont tout à fait comparables aux effets bien connus dits " de double sommation" qu'on connait très bien pour le bloc photogrammétrique, il s'ensuivra que les mesures des centrales de navigation à inertie seront faibles là où le bloc est faible et fortes là où il est fort. Elles entreront en concurrence avec les mesures du bloc, mais sans apporter vraiment de l'aide là où cela est nécéssaire comme le font les capteurs de pression ou G.P.S, pour lesquels la précision de la mesure est indépendante de la position du sommet perspectif dans le bloc.

Dans les centrales à inertie modernes les attitudes sont déterminées à l'aide de gyroscopes optiques, la mesures est alors une vitesse angulaire dont la limite de résolution serait du 1/1.000ème de degré par heure.

Par contre il semble que les centrales de navigation par inertie pourraient être très utilement employées lorsque le bloc, pour une raison quelconque, manquant de continuité, on ne pourrait plus employer de mesures aéroportées pour l'appuyer, ces mesures joueraient, alors, le rôle que joue le bloc habituellement en les lissant.

13.9. TYPOLOGIE DES MESURES AEROPORTEES

[28 BLAIS & CHAPMAN] se sont essayés à faire une typologie "a priori" de mesures aéroportées qui est basée sur le principe suivant:

Ces mesures sont classées, soit en mesures directes des inconnues des sommets perspectifs:

Xs, Ys ,Zs ,Ωs ,Φs ,Ks.

soit en différences premières de ces mêmes inconnues:

DXsi i-1 = Xsi - Xsi-1,..... DYs, DZs, DΩs, DΦs, DKs;

soit en différences secondes de ces inconnues.

D²X, D²Y, D²Z, D²Ω, D²Φ, D²K.

Ils avaient omis les mesures telles que les hauteurs laser qui touchent, à la fois, le sommet perspectif et un point au sol inconnu pour lesquelles on peut reprendre la séquence :mesures directes, différences premières, enfin différences secondes(s'il en existe).

On a largement exposé en ANNEXE I et dans le chapitre consacré aux mesures de pression les problèmes de pondération qui étaient posés par les calculs faits à l'aide d'équations posées en différences premières.

Il faudrait d'abord prendre en compte quelles sont les inconnues de faisceaux qui sont affectées par la ou les mesures.

On proposera ensuite deux grandes classes :

I°/ Les mesures touchant seulement les sommets perspectifs.

II°/ Les mesures touchant un sommet perspectif et un point ou des sommets perspectifs et des points.

Avec un qualificatif où intervient le temps d'où la nécessité de disposer d'une mesure nouvelle qui devra être parfaitement définie précise et unique:

1°: Les mesures directes, invariables dans le temps, qui peut être la durée de prise de vue du chantier ou de la bande.

2°: Les mesures variant linéairement avec le temps. On donnerait ce qualificatif aux mesures de vitesse comme les mesures DOPPLER seules et les mesures des gyromètres, mais aussi au "constantes" dérivant avec le temps, lorsque la durée de la prise de vue est assez longue.

3°: Les mesures variant avec le carré du temps. Dans cette catégorie on introduirait les mesures d'accélération

telles que celles des centrales de navigation à inertie, par contre, à l'inverse de ci-dessus les dérives de " constantes"en fonction du carré du temps ne paraissent être, dans l'instant, que des spéculations sans intérêt.

Puis des classes du modèle fonctionnel où on aurait:

a/ Les mesures directes qui sont introduites telles quelles dans la compensation, sans qu'il soit nécessaire d'ajouter une inconnue dans l'équation d'observation.

b/ Les mesures où l'équation d'observation doit comporter un modèle de transformation de similitude dans l'espace partiel ou complet.

Avec des sous-classes:

b1/ Des translations seulement, exemple les mesures des capteurs de pression et les mesures "calculées" de G.P.S.

b2/ La nécessité d'introduire un ou plusieurs coefficients d'échelle.

b3/ La nécessité d'introduire des rotations.

Il semble que tous ces "qualificatifs" couvrent ce qu'on connait actuellement des mesures aéroportées.

Le problème des simples, doubles différences ne touche que la manière dont on pose les équations, on ne pense pas qu'il puisse servir de base à une typologie des mesures.

Mesure touchant les	Modèle Fonctionnel	Le temps intervient comme paramètre
Sommets perspectifs	Sans Translations Rotations	Non Au 1er degré
Sommets perspectifs et les points	Similitude complète	Au 2ème degré

REFERENCES

(1)SHAMOS et PREPARATA,1984, Computationnal Geometry ,Ed Springer-Verlag.
(2) F.OLLIVIER (Commt),1929,La topographie sans topographes Traité de Photogrammétrie : Ed La Revue d'Optique Théorique et Instrumentale.
(3) Raymond BROSSIER 1984 - Le Nouveau Système APR-LASER de l'Institut Géographique National - Bulletin S F P T n° 94 .
(4) J.HUYGHE, 1977,Etude de l'effet de charnière dans le raccord de bande à bande en triangulation aérienne - Thèse de Maîtrise, Université LAVAL, CANADA.
(5)Y. LASCAUX,1987 - Remarques sur la densité et larépartition de l'équipement altimétrique - note interne SPH : IGN.
(6) M. BERNARD, 1986 - Quelques remarques à propos de la densité de l'équipement planimétrique - Note interne SPH : IGN, janvier.
(7) C.MILLION,1989,Equivalence entre le calcul des stuctuires mécaniques élastiques et celui de la compensation des réseaux par les moindres carrés, Journal de l'E.S.G.T, Mars.
(8) Kurt KUBIK, 1987 - A note on Photogrammetrie Bloc Adjustment with Additionnal Parameters Photog. Eng. and Rem. Sens. Vol 53, n°11, pp 1531 : 1532
(9) Y.D. HUANG, 1986 - Application of biaised Estimation to close Range Photogrammetry - Data-Reduction : in Proceed. I.S.P.R. , vol 25 , part 5 - Ottawa , pp 49 : 56.
(10) Rolf Dieter DÜPPE,1984, Kombinierte Ausgleichung in der Photogrammetrie: Programmkonzeption und Beispiele : in Proced . Comm III ;I.S.P.R , XV Congress .pp:117:129. RIO de JANEIRO.
(11) Y.D.HUANG,1986, More Remarks on Self Calibration ibid 57 : 67
(12) Ph HOTTIER, 1976 - Accuracy of Close Range Analytical Restitutions : Practical Experiments and Prediction : in Photog Eng and Rem. Sensg . vol 42 , n°3 , march : pp 345 : 375 .
(13) Dean W. WICHERN ; Gilbert A. CHURCHILL, 1978 - A Comparison of Ridge Estimations : in Technometrics, vol 20 n° 3, August pp 301 311.
(14) C.S. FRAZER, 1982 - Optimatization of Precision in Close Range Photogrammetry : in Photog Eng and Rem. Sens - pp 561 : 570
(15) d° 1984, Network Design Considerations for Non Topographic Photogrammetry : in Photo Eng and Rem.Sens. vol 50, August, pp 1115 : 1126.
(16) Ph HOTTIER, 1976 - Nouvel Exposé de la théorie des Moindres carrés ; juillet, Biblio. IGN.
(17) G. MADER ; W. CARTER ; B. DOUGLAS, 1986 - Decimeter Precision -Aircraft Positioning Using GPS Carrier Phase Measurements- NOAA

(18) G.BONIN ,1985, Exemple de réalisation d'un récepteur NAVSTAR/G.P.S; Institut de Navigation.
(19) K.P. SCHWARZ , C.S. FRASER ; P.C. GUSTAFSON, 1984 - Aerotriangulation Without Ground Control - ISPR Comm. I. Rio de Janeiro p237 : 250
(20) Peter FRIESS, 1984 - A Simulation Study on the Improvement of Aerial Triangulation By Navigational Data : in - d° -
(21) I. SAASTAMOINEN, 1970 - Contributions to the theory of Atmospheric Refraction : in Bulletin Géodésique 105.106.107. part II Refraction Corrections in Satellite Geodesy
(22) d° 1972 - Refraction Photogram Eng. pp 799 : 810
(23) W.B. KRABILL ; J.G. COLLINS ; L.E. LINK ; R.N. SWIFT , M.L. BUTLER, 1984. Airbonne Laser Topographie Mapping Results ; in Photo. Eng. et Rem. Sens. Vol 50 n° 6 June pp 685 : 694
(24) H.SHREIER, J.LOUGHEED,J.R.GIBSON, J.RUSSELL,Nov 84, Calibrating an Airborne Laser Profiling System : in Photog. Engineering & Rem. Sensing , Vol 50, N°11,pp 1591:1598.
(25) Richard MOREAU ; Luc M. A. JEUDI, 1986 - Profilomètrelaser-Inertiel (P.L.I.) : un essai qualitatif en terrain boisé .in Le Géomètre Canadien, vol 40, n° 1, pp 23 : 28.
(26) Donald.D.LIGHT: Photo Geodesy from APOLLO,in Photog Eng. Remote Sensg 7. 574 : 587
(27) Vidal ASHKENAZI ; Joan YAU ; Significance of Discrepancies in the Processing of GPS Data with Differents Algorithms :in Bulletin Géodésique, 60 pp 229 : 239
(28) J.A.R. BLAIS and M. A. CHAPMAN - The Use of Auxiliary Airborne Data in Space - Photogrammetric Block Adjustments, 1984 : The Canadian Surveyor. Vol 38 n°1 p 3 : 14 .
(29) Duane C. BROWN, 1976 - The Bundle Method, Progress and Prospect : XIII Congress of the International Society for Photogrammetrie - Helsinki
(30) E.DURAND 1961 Solutions numériques des équations algèbriques.MASSON & Cie].
(31) Wolfang FAIG, 1976 - Independant Models Triangulation with Auxiliary Vertical Control : XIII International Congress of Photogrammetry - Helsinki
(32) H.G. VERIE, 1968 - Theorical Height Accuracy of Strip and Block Triangulation With and Without Use of Auxiliary Data : in Photogrammetria 23, pp 19 : 44
(33) Friedrich ACKERMANN, 1986 - X.G. LÖFSTRöM Memorial Lecture-Camera Orientation Data for Aerial Triangulation : in The Photogrammetrie Journal of Finland - Vol 10 n° 1.
(34) Ph HOTTIER, 1981 - Théorie de Baarda : détection des fautes et fiabilité des estimations et ses applications en photogrammétrie : in bulletin SFPT n° 84 pp 5 : 19.
(35) Hans WERNER, 1984 - Automatic Gross Error Detection By Robust Estimation : in Proced. ISPRS , Comm III , Rio de Janeiro pp 1101 :1108.
(36) S.F. El HAKIM ; H. ZIEMAN, 1984 - A step by step strategy for Gross Error Detection : in Photog Eng and Rem. Sens , vol 50, n°6, June , pp: 713 : 718.
(37) Albert K CHONG, 1987 - A Robust Method for Multiple Outliers Detection in Multi-Parametric Models : in Photog. Eng. & Rem. Sens. vol 53, n° 6 , June : pp 617 : 620.
(38)Kurt KUBIK,Kenneth LYONS,1988,Photogrammetric Work Without Blunders : in Photog. Engineering & Rem. Sensing, Janvier,pp 51:54.

(39) Ch. MEYER., 1988, Statoscope embarqué en Guyane, Note technique, S.T.N ,Canevas et T.S .I.G.N.
(40) J. DUCLOUX, septembre 1986 - Etude des Systématismes en Photogrammètrie Aerienne - IGN, Bibliothèque.
(41) R. BROSSIER ; G. NARD ; J. RABIAN ; R. GOUNON, 1986 - Use of the TR5-S B GPS Receiver in Airborne Photography Survey : Proc. ISPRS Symposium Commission I, Stuttgart, 1-5 september pages 589-596 (ESA SP 252)
(42)R.BROSSIER,C.MILLION,A.REYNES,1988, Applications photogrammétriques du récepteur SERCEL G.P.S TR5S-B à l'Institut Géographique National (En anglais)in Proced.of the I.S.P.R.Congress Commission I, Working Group I/3, KYOTO, July.Vol 27 Part B1 p 1: 18.
(43) BEUTLER 1986.Comparison between Terrameter and G.P.S Results-and how to get there.Proceedings of C.A.S.CERN;GENEVA.
(44) RINNER cité dans JORDAN EGGERT KNEISSL,1972, Handbuch der Vermessungkunde/ Band III a/1 Ed: J.B.Metzler, Stuttgart.
(45) Richard KEEGAN, 1976 - The Global Positioning System and Its Application to Photogrammetry : in Proceed. XIII International Congress of Photogrammetry - Helsinki -
(46) Van Philipp HARTL ; Aloys WEHR, 1986 - Chancen der GPS-Satellitennavigation für die Luft Photogrammetrie Bildmessung und luftvildwesen 54 - Helft 6
(47) Gérard R. MADER, 1986 - Dynamic Positioning Using GPS Carrier phase Measurements : in Manuscripta Geodetica 11 : 272 :277
(48) Colonel Philipp J. BAKER, 1987 - Le GPS en l'an 2000 et après : in Navigation (En français) n° 137 - Janvier
(49) Edward J. KRAKIWSKY ; Donald B. THOMSON, 1974 - Mathematical Models for Combinaison of terrestrial and Satellite Networks : in The Canadian Surveyor , vol 28 , n°5 , december: pp 606 : 613.
(50) C. BOUCHER,1980, Formulaire pour la transformation de coordonnées Tridimensionnelles cartesiennes ou géographiques entre deux systèmes géodésiques - NTI à n° 8 IGN - NT/G n° 9.
(51) W.M. WELSCH, 1986 - Problems of Accuracies in Combined and Satellite Control Network : in Bulletin Géodésique.
(52) C. MILLION, 1985 - Etude de la Déformation de clichés aériens - Mémoire de DEA: Biblio I.G.N.
(53) Alfred KLEUSBERG, 1986 - Kinematic Relative Positioning Using GPS Code and Carrier Beat Phase Observations :in Marine Geodesy, volume 10, n° 3/4 257 : 273.
(54) P.FRIESS,July 1988,Empirical Accuracy of Positions Computed from Airborne G.P.S.Data : in Proced. I.S.P.R. KYOTO Comm III.(à paraître).
(55)James R.LUCAS,1988,Photogrammetric Evaluation of Airborne G.P.S. NOAA : in Proced. I.S.P.R Congress Kyoto.(à paraître).
(56) H.M. DUFOUR, 1986 - Les référentiels Régionaux Inverses : une synthèse possible entre la Géodésie Bi et Tridimentionnelle ; Bolletino di Geodesia E Scienze Affini n° 4 ; anno X L V.
(57) B.FEESS,J.IROZ,A.SATIN,B.WINN - C.WISEMANN - B.HERMANN, E.SWIFT - H.BEISNER - D.ALLAN, D.DAVIES,M.WEISS -W.KLEPCZYNSKI,- F.WITHINGTON :1987: GPS Satellite-to-User Range Accuracies : A Calibration Experiment Navigation, Vol 34, N°3, pp229:249] .
(58)P.WILLIS,1988, Compte rendu d'expérimentation du G.P.S.cinématique; Test G.P.S entre la tour et le toit de la logistique à l'I.G.N. Mai; CR/G N°9 SGN; I.G.N.

(59)P.WILLIS et C.BOUCHER, 1988, Les applications du G.P.S à l'I.G.N. Etat actuel et perspectives. Mai, NT/G N°55; SGN; I.G.N.
(60)Egon DORRER,Chritian SCHWIERTZ. Experiments with G.P.S. Supported Aerotriangulation; Institute of Photogrammetry and Cartography(I.P.K) Munich Bundeswehr University Neubiberg ,Rep.Féd. d'Allemagne.(à paraître).
(62) J.LINDENBERGER,July 1988,Modelling Orientation Parameters of Sensors Platforms : in Proced. I.S.P.R KYOTO Comm I/3.(à paraître).
(63) Barry.A. STEIN,Summer 1985, Satellite Selection Criteria During Altimeter Aiding of G.P.S. : in Navigation (En anglais) , Vol 32, N°2.
(64) POPPER K.R.,1934 Logik der Forschung.
1959 The Logic of Scientific Discovery. Ed: Hutchinson & C° Publishers London
1974 La logique de la découverte scientifique Ed: Payot
(65)Richard.A.SNAY,1976,Reducing the Profile of Sparse Symmetric Matrices : in Bull. Geod. 50-4 pp 341:352.
(66) F.James HEINDL, Apr1981,Direct Editing of Normal Equations of Banded Bordered Form : in Photog.Engg & Rem. Sensg.,Vol 47 N°4 pp : 489:493.
(67) Yves EGELS & Dominique KIRSNER,1981, Le logiciel TRASTER de l'Institut Géographique National, Bul. S.F.P.T n°84 (1981-4)
(68) H. EBNER, 1976 - Self Calibrating Block Adjustment : XIII Congress of International Society for Photogrammetry - Helsinki Commission III.
(69) G.H. SHUT, 1979 - Selection of Additionnal Parameters for the Bundle Adjustment. Photog. Eng. and Rem. Sens. Vol 45 N°9 septembre, pp 1243 : 1252
(70) Gunther KUPFER and Landolf MAUELSHAGEN, 1982 - Correlations and Standards Errors in Bundle Block Adjustment with some Emphasis an Additionnal Parameters : in Photogrametria, 38, pp 57 : 72.
(71) Ernest RUFNER, 1946 - Mise en équation des résultats d'expériences. Neufchâtel.

ANNEXES

ANNEXE I

I. LES DIFFICULTES RENCONTREES DANS LA RECHERCHE DES MODELES STOCHASTIQUES ET FONCTIONNELS DES MESURES AEROPORTEES.

On s'est servi, pour traîter ce sujet des études faites pour comparer les résultats de différents logiciels de calcul de G.P.S.[27 ASHKENAZI]

Pour les mesures G.P.S qu'on a utilisées, l'observable, c'est-à-dire la quantité directement mesurée, n'est pas la position du récepteur qui est entrée dans les calculs d'aérotriangulation, mais les mesures des pseudo-distances et les comptages des battements DOPPLER qui ont été transformés en positions des sommets par le logiciel du fabricant; les positions des sommets sont corrèlées mais il ne peut pas en être tenu compte dans les calculs ultérieurs.

En géodésie de précision les quantités mesurées ne sont plus que les battements et la phase. Si les observations sont faites sur n satellites, simultanémment en deux stations,elles seront au nombre de 2.n.

Si on note P(s,t,r) la phase mesurée entre le satellite s et le récepteur r au temps t on a:

$$P(s,t,r)=P(s,t)-P(t,r)+N(s,r)-f/c.L(s,t,r)$$ où

P(s,t) est la phase du satellite s à l'époque t
P(t,r) est la phase du récepteur r à l'époque t
N(s,r) est un entier inconnu
L(s,t,r) est la distance géomètrique entre le satellite s et le récepteur s à l'époque t. C'est la seules mesure utilisable mais elle est ambiguë.
f/c la fréquence de l'émission du satellite divisée par la célérité de la lumière égale à la longueur d'onde de la porteuse.

On cherche à éliminer le terme inconnu N(s,r) on peut faire la différence entre les observations des deux stations a et b soit:

$$P(s,t,b)-P(s,t,a)$$

Le terme $N(s,b-a)=N(s,b)-N(s,a)$ reste ambigu.
Cette ambiguïté entre les deux appareils peut être, elle-

même, éliminée en observant simultanémment plusieurs satellites par un calcul dit de double différence, la simple différence résultant du calcul précédent. Sur deux satellites observés p et s on a:

P(p-s,t,b-a)= différence des simples différences ci-dessus.

On montre que les triples différences faites entre des observations à deux époques u et t soit:
P(p-s,u-t,b-a) éliminent toutes les ambiguïtés au prix d'une perte importante de précision.
Si on admet que l'écart-type sur la mesure de la phase est σ et son poids $1/\sigma^2$ la matrice de poids de la simple différence prise comme observable sera alors:

$$1/2.\sigma^2 \ .I_{2,2}$$

La matrice de poids de la double différence sera:

$$1/8.\sigma^2.\begin{vmatrix} 3 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & 3 \end{vmatrix}$$

On aura bien entendu utilisé huit (8) observations;
La matrice des poids des triples différences serait également:

$$1/16.\sigma^2 \ .\begin{vmatrix} 3 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & 3 \end{vmatrix}$$

pour seize (16) observations utilisées.
On remarquera qu'à chaque échelon franchi le poids diminue c'est à dire qu'on se prive d'une partie de la mesure, le modèle fonctionnel est disloqué par les différences.
On a pu dessiner l'arbre des différences ci-dessous:

TD3

TD1 TD2

DD3 DD3'

DD2 DD2'

DD1 DD1'

	SD				SD				SD				SD			
s=	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
r=	a	a	a	a	b	b	b	b	a	a	a	a	b	b	b	b
t=	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2

ANNEXE II. LA LINEARISATION DE L'EQUATION FONDAMENTALE DE LA PHOTOGRAMMETRIE ANALYTIQUE.

A. GENERALITES.

Bien entendu il n'est pas question de chercher à innover dans ce domaine; et pourtant les présentations connues ne sont pas toutes satisfaisantes, car elles amènent à confondre deux types de formules: l'un, qui est le plus connu, permet d'écrire la matrice normale à partir des coordonnées clichés des points qui sont peu variables d'un chantier à l'autre, les dispositions des points dans les blocs ressortissant de quelques stéréotypes bien connus, fonction des recouvrements longitudinaux et transversaux des clichés. Cette première série de formules permet de mener des calculs d'erreurs sur des blocs théoriques en se passant de données réelles.

La seconde série de formules est celle qui est utilisée dans les programmes de calcul de compensation comme FAISCEAUX: pour une raison qui échappe au sens commun, elle est moins connue que la première; les dérivées partielles ne sont plus calculées à partir des coordonnées des points sur les clichés, qui sont invariables au cours des itérations, mais, ce qui est plus normal, à partir des éléments qui se modifient au cours des itérations, c'est-à-dire des résultats: les coordonnées des points et celles des sommets perspectifs, pour obtenir, après chaque itération, la dérivée, au dernier point qui a été calculé, de la fonction reliant les coordonnées des points et des sommets aux coordonnées des mêmes points vus sur les clichés, par l'intermédiaire des matrices de rotation approchées provenant, aussi, du calcul précédent; alors que la première série de formules calcule cette même dérivée au point définitif, ce qui, évidemment, ne permettrait pas d'itérer, ou, en tous cas, de se rapprocher du point définitif. Ce qui est sans conséquences si on précise bien ce que l'on peut faire avec, c'est-à-dire simplement inverser, ce qui n'est pas le résoudre le système.

En collationnant les différentes démonstrations provenant de pays aussi différents que l'Allemagne les Etats-Unis d'Amérique, l'U.R.S.S., l'Inde etc... on s'est convaincu de l'intérêt de présenter le résultat de ce tri. Comme par ailleurs on a trouvé au S.T.N. une démonstration des formules et, surtout, des notations, utilisées par le programme FAISCEAUX très simple et surtout très courte on a essayé la rendre encore plus accessible en abordant de façon un peu différente la dérivation de celle employée sur le document original.

B.NOTATIONS COMMUNES AUX DEUX EXPOSES.

Soit un cliché aérien qu'on peut, sans limiter la généralité de ce qui suis, considérer comme positif: On a mesuré les coordonnées image d'un point. Celles-ci sont rapportées, par un programme spécial réalisant une transformation affine des mesures brutes, a un système d'axes défini par les repères de fond de chambre et par l'axe optique de la chambre passant par le centre du cliché dont la position rend symétriques les distorsions radiales de l'objectif de prise de vue, ceci par des mesures très fines d'étalonnage qui permettent, aussi, de déterminer la distance principale notée p, qui sera introduite dans les calculs, et qui minimise les valeurs de la distorsion radiale de l'objectif qui seront corrigées, par zones concentriques, autour de l'origine des coordonnées-cliché dans le programme de calcul FAISCEAUX.

$$\mathbf{m} = \begin{vmatrix} xi \\ yi \\ 0 \quad (\text{zéro}) \end{vmatrix}$$

Figure 27 soit le vecteur **sm**

$$\mathbf{sm} = \begin{vmatrix} x \\ y \\ -p \end{vmatrix}$$

Où s est l'origine des coordonnées des images des clichés.

Où S est le sommet du cône perspectif dans le système des coordonnées du terrain. Dans le schéma il est confondu avec s, ses coordonnées dans le système du terrain sont:

$$\mathbf{S} = \begin{vmatrix} Xs \\ Ys \\ Zs \end{vmatrix}$$

Classiquement c'est une quantité inconnue, mais qui peut être une quantité mesurée (G.P.S, Statoscope...)

Où M est un point du terrain dont l'image sur le cliché est m:

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} XM \\ YM \\ ZM \end{vmatrix} \text{ ou } \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix}$$

On note le vecteur **f** qui représente les coordonnées du centre de perspective dans le système orthonormé lié au cliché

$$\mathbf{f} = \begin{vmatrix} xc \\ yc \\ p \end{vmatrix}$$

L'équation de colinéarité exprime qu'on peut passer du système des coordonnées du cliché au système des coordonnees du terrain: par multiplication par un scalaire μ, l'échelle du cliché au point m, variable en fonction de Z, et par application d'une rotation R.

Figure 27

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ -p \end{vmatrix} = \mu \cdot \left| R \cdot \begin{vmatrix} X-X_s \\ Y-Y_s \\ Z-Z_s \end{vmatrix} \right. \quad \text{ou}$$

$$m - f = \mu \cdot R \cdot (M-S)$$

$$m = \mu \cdot R \cdot (M-S) + f \quad \text{on note encore:}$$

$$m = \mu \cdot U + f$$

$$U = R.(M-S) = \begin{vmatrix} u1 \\ u2 \\ u3 \end{vmatrix}$$

On rappelle que:

$$i = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \qquad j = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} \qquad k = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

et que:

$$R = \begin{vmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r31 & r32 & r33 \end{vmatrix}$$

On élimine μ qui est variable d'un point du cliché à l'autre en faisant:

$$k^T.(m-f) = k^T.\mu.U \quad \text{d'où:}$$

$$1/\mu = \frac{k^T.U}{k^T.(m-f)} = -p/u3 = \frac{k^T.R.(M-S)}{k^T.(m-f)}$$

D'où encore:

$$m-f = -p/u3 \cdot U \quad \text{C'est à dire:}$$

$$\begin{vmatrix} x = -p.\ u1/u3 \\ y = -p.\ u2/u3 \\ -p = -p.\ u3/u3 \end{vmatrix}$$

On reconnait,sous une forme condensée , les formules plus classiques:

$$x = -p.\frac{r11.(X-X_s) + r12.(Y-Y_s) + r13.(Z-Z_s)}{r31.(X-X_s) + r32.(Y-Y_s) + r33.(Z-Z_s)}$$

$$y = -p.\frac{r21.(X-X_s) + r22.(Y-Y_s) + r23.(Z-Z_s)}{r31.(X-X_s) + r32.(Y-Y_s) + r33.(Z-Z_s)}$$

Les équations inverses seraient:

$$X-X_s = (Z-Z_s).\frac{r11.x + r21.y - r31.p}{r13.x + r23.y - r33.p}$$

$$Y-Y_s = (Z-Z_s).\frac{r12.x + r22.y - r32.p}{r13.x + r23.y - r33.p}$$

Les équations étant posées il "suffit" d'en calculer les dérivées partielles, c'est là que les deux présentations divergent.

C. CALCUL DES DERIVEES PARTIELLES PAR RAPPORT AUX COORDONNEES CLICHE.

On a quinze inconnues à determiner:
Neuf inconnues de R liées par six conditions d'orthogonalité, les trois inconnues indépendantes sont notées:

$$dA = \begin{vmatrix} \alpha \\ \beta \\ \Gamma \end{vmatrix}$$

Trois inconnues de position du sommet perspectif:

$$dS = \begin{vmatrix} dXs \\ dYs \\ dZs \end{vmatrix}$$

Trois inconnues de point:

$$dM = \begin{vmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{vmatrix}$$

Plus un certain nombre d'inconnues de systématisme ou de modélisation de la mesure.
On cherche à calculer:

TRANSLATIONS		ROTATIONS	
$\delta x/\delta X$	$\delta y/\delta X$	$\delta x/\delta \alpha$	$\delta y/\delta \alpha$
$\delta x/\delta Y$	$\delta y/\delta Y$	$\delta x/\delta \beta$	$\delta y/\delta \beta$
$\delta x/\delta Z$	$\delta y/\delta Z$	$\delta x/\delta \Gamma$	$\delta y/\delta \Gamma$
$\delta x/\delta Xs$	$\delta y/\delta Xs$		
$\delta x/\delta Ys$	$\delta y/\delta Ys$		
$\delta x/\delta Zs$	$\delta y/\delta Zs$		

1.TRANSLATIONS.

On suppose que l'axe de la photographie aérienne est presque vertical, dans ce cas on note sur la figure 27

$x/p = Xs-X/Zs-Z$, $y/p = Ys-Y/Zs-Z$ en prenant la dérivée logarithmique des deux membres:

$$dx/x = -dp/P + d(Xs-X)/(Xs-X) - d(Zs-Z)/(Zs-Z)$$

$$dy/y = ... \quad d(Ys-Y)/(Ys-Y) - ..... \quad \text{si on developpe:}$$

$$dx = -x/p\ .dp - x.dX/(X-X_B) + x.dX_B/(X-X_B) + x.dZ/(Z-Z_B) - x.dZ_B/(Z-Z_B)$$

mais $x/(X-X_B) = \mu$ et $1/(Z-Z_B) = x/(X-X_B).p = \mu/p$

d'où

$$dx = -x/p.dp - \mu.dX + \mu.dX_B + \mu.x/p\ .dZ - \mu.x/p.dZ_B \text{ et}$$

$$dy = -y/p.dp - \mu.dY + \mu.dY_B + \mu.y/p.dZ - \mu.y/p.dZ_B$$

2.ROTATIONS.

On applique à l'échelle du cliché une petite rotation inconnue on note cette opération.

$$\begin{vmatrix} x' \\ y' \\ -p' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -\Gamma & \beta \\ \Gamma & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{vmatrix} . \begin{vmatrix} x \\ y \\ -p \end{vmatrix}$$

On obtient en divisant le résultat par $\mu.p$

$$x'/p = x/p - \Gamma.y/p - \beta$$

$$y'/p = \Gamma.x/p + y/p + \alpha$$

$$p'/p = \beta.x/p - \alpha.y/p + 1$$

On divise les deux premières expressions par la troisième:

$$x'/p' = \frac{x/p - \Gamma.y/p - \beta}{\beta.x/p - \alpha.y/p + 1}$$

$$x/p - \Gamma.y/p - \beta = x'/p' - \alpha.x'.y/p.p' + \beta.x.x'/p.p'$$

$$y'/p' = \frac{\Gamma.x/p + y/p + \alpha}{\beta.x/p - \alpha.y/p + 1}$$

$$\Gamma.x/p + y/p + \alpha = y'/p' - \alpha.y.y'/p.p' + \beta.x.y'/p.p'$$

Les angles étant petits on peut confondre p et p' y et y' x et x' dans les produits ; on met , par contre , en évidence :

$$dx = x'-x$$
$$dy = y'-y$$

$$dx = -\alpha.x.y/p + \beta.(p + x^2/p) - \Gamma.y$$

$$dy = -\alpha.(p+y^2/p) + \beta.x.y/p + \Gamma.x$$

Rappelons que les inconnues sont α, β et Γ

D.CALCUL DES DERIVEES PARTIELLES PAR RAPPORT AUX COORDONNEES TERRAIN ET AUX ELEMENTS DE LA MATRICE DE ROTATION APPROCHEE.

La différence essentielle provient de la dérivation de la matrice de rotation et des notations utilisées.
Soit une rotation autour d'un vecteur unitaire :

$$\Omega = \begin{vmatrix} a \\ b \\ c \end{vmatrix}$$

On appelle axiateur (44 K.RINNER cité dans JORDAN,EGGERT ,KNEISSL :Handbuch Der Vermessungskunde/Band III a/1 Ed.J.B.Metzler: Stuttgart, 1972) axiateur de Ω noté $\hat{\Omega}$:

$$\hat{\Omega} = \begin{vmatrix} 0 & -c & b \\ c & 0 & -a \\ -b & a & 0 \end{vmatrix}$$

C'est la matrice antisymétrique du produit vectoriel :

$\Omega \wedge V = \hat{\Omega} . V = -\Omega . \hat{V}$ (anticommutativité du produit vectoriel)

La rotation R peut s'écrire

$R = e^{\hat{\Omega}.\theta}$

On peut ainsi calculer facilement la différentielle d'une matrice rotation écrivont d'abord :

$\hat{\Omega}.\theta = A$

$$A = \begin{vmatrix} a.\theta \\ b.\theta \\ c.\theta \end{vmatrix} \begin{matrix} \alpha \\ \beta \\ \Gamma \end{matrix}$$

$R = e^{\hat{A}}$ d'où

$dR = e^{\hat{A}} . d\hat{A} = R . d\hat{A}$

Appliquée à nouveau à un vecteur V cette différentielle peut s'écrire:

$dR.V = R.d\hat{A} .V$

soit en prenant en compte l'anticommutativité du produit vectoriel:

$dR . V = -R . \hat{V}. dA$

En notation symbolique, les équations permettant de calculer les coordonnées cliché à partir des coordonnées du terrain, s'écrivent:

$$x = -p \frac{i^T . R .(M-S)}{k^T . R .(M-S)} \quad ; \quad y = -p \frac{j^T . R.(M-S)}{k^T . R.(M-S)}$$

Si on se souvient de la notation :

$R.(M-S) = U$

$$x = -p\frac{i^T . U}{k^T . U} \qquad y = -p\frac{j^T . U}{k^T . U}$$

En différentiant il vient:

$$dx = -p\frac{k^T.U.i^T - i^T.U.k^T}{(k^T.U)^2}.dU$$

$$dy = -p\frac{k^T.U.j^T - j^T.U.k^T}{(k^T.U)^2}.dU$$

avec $dU = dR.(M-S) + R.d(M-S)$

ou encore:

$dU = (-R.\hat{}(M-S).dA + R.d(M-S))$ en raison, encore, de l'anticommutativité du produit vectoriel en développant les valeurs de:

$k^T.U.i^T$, $i^T.U.k^T$, $k^T.U.j^T$, et de $j^T.U.k^T$

et en remarquant que :

$k^T.U$ est un scalaire noté u3 on a finalement:

$$\begin{vmatrix} dx \\ dy \end{vmatrix} = p/u3^2 .V.R\,(dS-dM) + p/u3^2 .V.R.\hat{}(M-S).dA$$

Les inconnues sont :

dS ,dM et dA.

On note $V = \begin{vmatrix} u3 & 0 & -u1 \\ 0 & u3 & -u2 \end{vmatrix}$

et, c'est encore un rappel:

$$\hat{}(S-M) \equiv \begin{vmatrix} 0 & -(Z_s - Z) & (Y_s - Y) \\ (Z_s - Z) & 0 & (X_s - X) \\ -(Y_s-Y) & -(X_s-X) & 0 \end{vmatrix}$$

$$|\,dA\,| = d\theta$$

$$\begin{vmatrix} u1 \\ u2 \\ u3 \end{vmatrix} = \begin{matrix} r11.(X-X_s) + r12.(Y-Y_s) + r13.(Z-Z_s) \\ r21.(X-X_s) + r22.(Y-Y_s) + r23.(Z-Z_s) \\ r31.(X-X_s) + r32.(Y-Y_s) + r33.(Z-Z_s) \end{matrix}$$

$$dA = \begin{vmatrix} \alpha \\ \beta \\ \Gamma \end{vmatrix}$$ Cette petite rotation a pour axe:

$[\alpha/d\ ,\ \beta/d\ ,\Gamma/d]^T$ avec:

$$d = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \Gamma^2} \quad \text{et}$$

$$d\theta = 2.\text{Arc tg } d \quad \text{et}$$

$$dR = e^{dA} = e^{\hat{A}d\theta} \quad \text{et}$$

$$\hat{A} = 1/d \cdot \begin{vmatrix} 0 & -\Gamma & \beta \\ \Gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{vmatrix}$$

En pratique un sous programme calcule les termes de la matrice de RODRIGUES:

$$dR = 1/D \begin{vmatrix} 1+\alpha^2-\beta^2-\Gamma^2 & 2.\alpha.\beta-2.\Gamma & 2.\alpha.\Gamma+2.\beta \\ 2.\alpha.\beta+2.\Gamma & 1-\alpha^2+\beta^2-\Gamma^2 & 2.\beta.\Gamma-2.\alpha \\ 2.\alpha.\Gamma-2.\beta & 2.\beta.\Gamma+2.\alpha & 1-\alpha^2-\beta^2+\Gamma^2 \end{vmatrix}$$

Avec $D = 1+\alpha^2+\beta^2+\Gamma^2 = 1+d^2$

III. LE PROGRAMME "FAISCEAUX"DE L'INSTITUT GEOGRAPHIQUE NATIONAL.

A. DESCRIPTION GENERALE.

Le programme "FAISCEAUX" de l'I.G.N a été écrit par MM J.C DAYET et Y. EGELS qui ont bénéficié de l'ensemble de l'expérience acquise à l'I.G.N. par leurs devanciers notamment M.Ph.-HOTTIER et le programme ARIANE, M.G de MASSON d'AUTUME et M.CREHANGE, ce programme a remplacé, en Juin 1985, un ancien programme de calcul par modèles indépendants, en service jusque là.

Le programme calcule les coordonnées de points observés sur les clichés, dans le référentiel des points de terrain, après compensation simultanée des mesures hétérogènes du réseau photogrammétrique, des points d'appui, et, maintenant, des mesures aéroportées, par les moindres carrés.

Les relations qui existent entre les coordonnées des points observés sur les clichés et les coordonnées du terrain, pour le même point, n'étant pas linéaires, il est nécessaire de calculer, avant la compensation, les coordonnées approchées de terrain des points observés sur les clichés, afin de pouvoir introduire, dans le calcul, des relations rendues linéaires au voisinage de la solution.

Le programme peut donc être divisé en trois parties, dont les deux premières ont, précisement, pour objet de calculer les positions approchées des points et, la dernière, la compensation d'ensemble de toutes les mesures par les moindres carrés.

La compensation simultanée de mesures hétérogènes pose le grave problème du choix des poids relatifs des différentes mesures, qui doivent être connus, a priori, avant d'entrer dans le calcul. Il a été résolu par M.HOTTIER qui a bien voulu me communiquer ses idées sur le sujet qui présente un intérêt théorique et pratique certain pour les mesures non affectées par des systématismes.

M KOPLICKU a entrepris une étude sur ce sujet dont l'intérêt se trouve augmenté lorsqu'on a l'intention de mettre au point une variante du programme acceptant d'autres mesures telles que les hauteurs du point de vue au dessus du sol par laser ou des altitudes barométriques ou, enfin, les coordonnées des sommets perspectifs, obtenues d'un récepteur G.P.S/NAVSTAR.

Les variantes au programme FAISCEAUX d'origine, pour les mesures aéroportées, ont été écrites par M.D. MOISSET.

B. LE CALCUL DES COORDONNEES APPROCHEES DES POINTS, DES SOMMETS PERSPECTIFS, ET DES ATTITUDES DE LA CHAMBRE.

1. CALCUL PAR BANDE.

Ce calcul est effectué au moment de la mesure des coordonnées des points sur les clichés, à l'aide d'un stéréocomparateur, afin de pouvoir faire, sur le champ, les reprises qui seraient rendues nécessaires si l'enchaînement de la bande n'était pas jugé satisfaisant; en effet, à ce moment, les clichés sont encore en place, c'est-à-dire calés sur leurs porte-clichés, et l'observateur peut reprendre les mesures qui pourraient être jugées inacceptables après examen des résidus d'ajustement des calculs d'enchaînement du cliché à son voisin, sans avoir à reprendre la procédure d'initialisation des observations, qui commence par la mesures des coordonnées des huit repères de fond de chambre, dans le système du comparateur.

Deux clichés en place sur un stéréocomparateur de précision permettent l'examen stéréoscopique d'un modèle du terrain; l'opérateur mesure les coordonnées des cinq points dits "de Nadir" et des points utiles vus sur la partie commune aux deux clichés. Voir les figures 28 et 29 sur lesquelles on a indiqué les points A,N, et B qui sont trois des cinq points de "nadir, pour plus de clarté dans le dessin on n'a pas indiqué les deux points intermédiaires situés à mi-chemin entre A et N et entre N et B.

Les points de nadir sont proches d'une droite, perpendiculaire au sens du vol, joignant les milieux des côtés opposés, ils sont situés très précisemment dans la zone très étroite vue sur trois clichés successifs de la même bande.

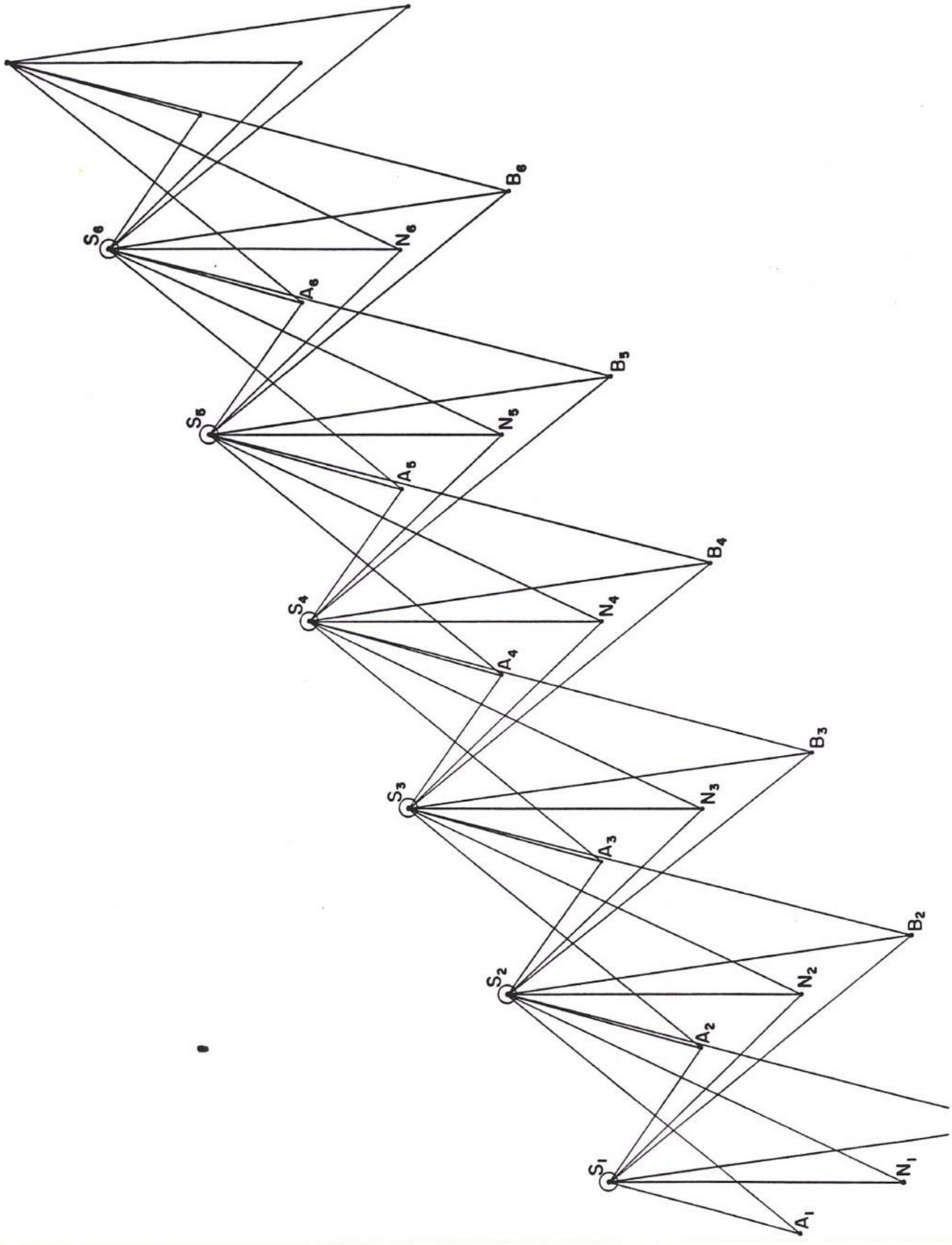
Ils ont été choisis et marqués, au cours d'une préparation minutieuse, au voisinage de points naturels bien visibles; à l'étranger, certains de ces points sont signalés au sol par une balise ou par tout autre moyen les rendant visibles et identifiables sur les photographies.

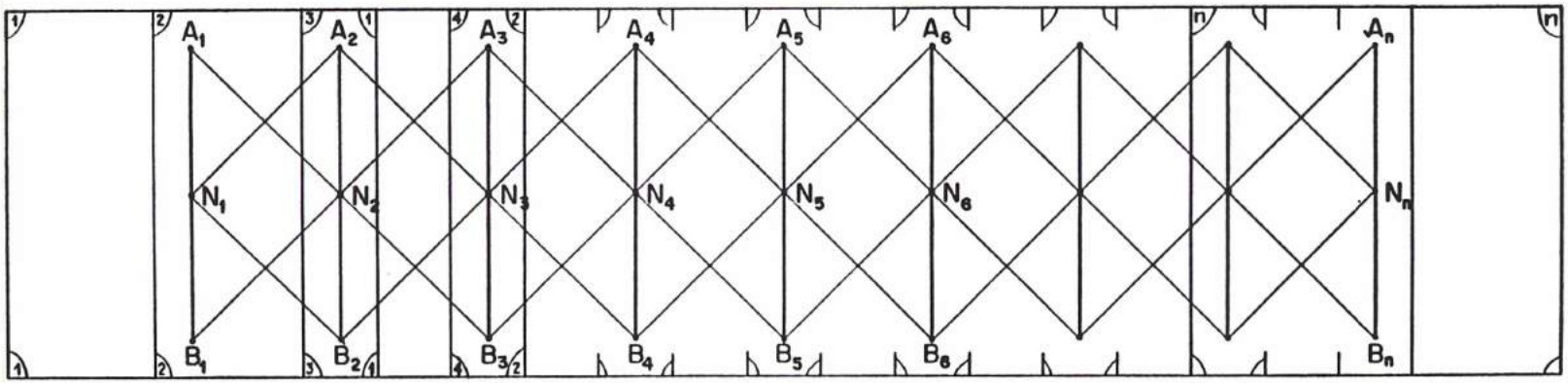
Si par suite d'incident au cours du vol cette zone commune à trois clichés n'existait pas, ou si trop peu de points n'y étaient visibles et identifiables, la bande serait interrompue, il n'y aurait plus aucune liaison rigide longitudinale .

Après saisie des coordonnées cliché des points, le programme calcule le site du second cliché, la convergence et le déversement des deux clichés à lier entre eux, qui annulent, au mieux, les parallaxes transversales sur les points mesurés et ce, dans un référentiel local ayant pour axe des X la base reliant les deux sommets perspectifs, pour origine le premier sommet, et pour direction le second; l'axe des Z, ascendant, est perpendiculaire au précédent et dans le plan contenant, à la fois, l'axe des X et l'axe optique du premier cliché; l'axe des Y forme un trièdre de référence direct avec les axes précédents.

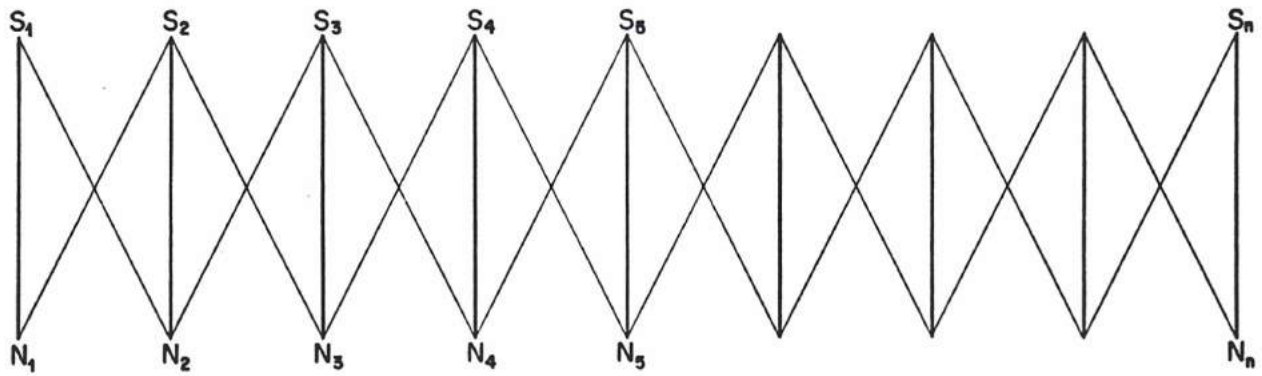
La longueur de la base du modèle formé à l'aide du premier et du second cliché d'une bande est prise pour unité, elle fixe l'échelle de la bande. Les coordonnées des points du modèle, points de nadir, points utiles et sommets perspectifs sont calculées dans ce référentiel, qui sera celui de toute la bande. Dans ce système les coordonnées du second sommet sont

Figure 28





PLAN



ÉLÉVATION

Figure 29

connues $X_s = 1$, $Y_s = 0$, $Z_s = 0$

On se fixe des valeurs approchées pour les coordonnées des points de nadir (points de Von Grüber) du premier cliché; puis on fait un calcul des coordonnées de ces points.

Les coordonnées du troisième sommet sont calculées à partir des coordonnées des points de nadir du premier cliché, ainsi que les coordonnées des points de nadir du second cliché.

Cette même opération est, ensuite, répétée jusqu'à la fin de la bande; les coordonnées du modèle rigide formé par tous les points de la bande sont ainsi calculées dans le référentiel lié au premier et au second cliché et à une échelle quelconque, variable d'une bande à l'autre, qui est celle fixée par la distance entre ses deux premiers sommets perspectifs.

On aura remarqué que les coordonnées des points de nadir des différents clichés peuvent faire l'objet d'un double calcul, on dispose de redondances qui permettrait de calculer deux séries de coordonnées différentes pour ces mêmes points; en fait on en sort la moyenne compensée, et on détermine les écarts à cette moyenne, qui sont ensuite comparés à une valeur de tolérance, assez large pour tenir compte du manque de rigueur de l'ajustement qui est fait, ceci étant sans conséquences sur des valeurs approchées; en cas de rejet les mesures sont reprises aisément puisque les clichés sont encore en place. Une compensation rigoureuse serait sans objet à ce stade du calcul; pourtant certains auteurs préconisent des méthodes différentes qui ont le mérite d'être rigoureuses, elles n'auraient d'intérêt que si elles n'étaient pas plus longues et si elles pouvaient éviter la reprise de tous les points mesurés or, au contraire, ces auteurs démontrent que les résidus les plus forts n'apparaissent pas toujours sur les points dont les mesures sont fausses, mais aussi sur leurs voisins, par conséquent une méthode de compensation rigoureuse serait sans objet à ce stade du calcul, sauf si la méthode de compensation qui reprendra ces positions approchées ne pouvait que traiter les modèles par une transformation de similitude (compensation par modèles indépendants) sans pouvoir leur apporter de distorsion, c'est tout l'intérêt des programmes de calcul par faisceaux par rapport à ceux compensant les mesures par modèles indépendants.

C. CALCUL DIT "DE PREPARATION".

Ce calcul a pour objet d'assembler les bandes pour former le bloc, de mettre le bloc en place sur ses points d'appui, que ce soit les points au sol ou les sommets perspectifs fournis par un récepteur G.P.S, et d'ordonner la matrice normale pour qu'elle occupe le moins de place possible en mémoire. Pour cela on impose à tous les sommets une transformation de similitude dans l'espace permettant d'appliquer, au mieux, les points d'appui sur le terrain et assurant, simultanément, la jonction entre les bandes voisines. Une transformation de similitude dans l'espace n'étant pas linéaire on doit opérer en deux phases.

1. PREMIERE PHASE.

On procède à une mise en place planimétrique seule, car cette transformation est linéaire, en outre, l'angle de déversement K est le seul qui ne puisse pas être considéré comme petit, il peut être quelconque; par contre, les angles de site et de convergence, sont petits.

$$\begin{vmatrix} X_T \\ Y_T \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} T_X \\ T_Y \end{vmatrix} + \mu . \; [R] \begin{vmatrix} X_M \\ Y_M \end{vmatrix}$$

ou en développant:

$$\begin{aligned} -X_T + T_X + 0 + a.X_M - b.Y_M = 0 \\ -Y_T + 0 + T_Y + a.Y_M + b.X_M = 0 \end{aligned}$$

On obtient des valeurs approchées permettant de linéariser les relations de similitude dans l'espace et de résoudre le système non linéaire par itérations.

Les seules inconnues par bande sont deux translations (en X et en Y), un coefficient d'échelle,et l'angle de déversement K qui, rappelons le, est généralement quelconque,et ne peut, en aucun cas, être considéré comme petit.

On se sert des coordonnées planimétriques des points d'appui, ou des sommets perspectifs, dans le cas de G.P.S seul, des relations de liaison entre bandes qui expriment , simplement, que les points de liaison entre bandes ont les mêmes coordonnées.

Pour les points entre les bandes 1 et 2 et le point M:

$$\begin{aligned} T_{X1} + a_1 . X_M - b_1 . Y_M - T_{X2} - a_2 . X_M + b_2 . Y_M = 0 \\ T_{Y1} + a_1 . Y_M - b_1 . X_M - T_{Y2} - a_2 . Y_M - b_2 . X_M = 0 \end{aligned}$$

On a donc quatre inconnues par bande b :

T_{Xb} , T_{Yb} , a_b , b_b. Les numéros des inconnues étant:

1 2 3 4

X_T est numéroté 5.

On calcule, à nouveau, toutes les coordonnées des points de la bande et des sommets perspectifs (G.P.S.) en appliquant les paramètres d'une similitude dans l'espace, la similitude plane ayant été complètée en considérant les paramètres de site Ω, et de convergence Φ, comme nuls.

On a $a = \mu . \cos K$

$b = \mu . \sin K$.

$$\mu \begin{vmatrix} \cos K & -\sin K & 0 \\ \sin K & \cos K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

D'où le calcul des points approchés:

$$
\begin{aligned}
X_o &= T_x + x.\mu.\cos K - y.\mu.\sin K \\
Y_o &= T_Y + y.\mu.\sin K + y.\mu.\cos K \\
Z_o &= T_z - \mu.p
\end{aligned}
$$

où $\mu.p$ représentant la hauteur de vol

si on fait $Z_M = \sum_{1}^{n}$ (Altitude des points connus)/n.

$$T_z = Z_M + \mu.p$$

si p représente la focale et μ le facteur d'échelle.

Au cours de cette phase on met en oeuvre une procédure d'élimination automatique des points d'appui et des points de liaison entre bandes faux. Les premiers sont éliminés, les seconds seront dédoublés manuellement au cours du calcul de compensation. L'élimination automatique pourra être interrompue lorsque l'opérateur le jugera utile.

2. DEUXIEME PHASE.

Pour chaque point de liaison entre bandes on écrit trois équations linéarisées de liaison entre bandes, l'une en X, l'une en Y, l'une en Z; ces relations expriment, à nouveau, qu'après l'application d'une petite similitude dans l'espace, leurs coordonnées seront égales deux à deux.

$$
\begin{aligned}
T_x + 0.T_Y + 0.T_z + d\mu.X_c + \alpha.0 + \beta.Z_c - \Gamma.Z_c + X_o - X_T &= 0 \\
0.T_x + T_Y + 0.T_z + d\mu.Y_c - \alpha.Z_c + \beta.0 + \Gamma.Z_c + Y_o - Y_T &= 0 \\
0.T_x + 0.T_Y + T_z + d\mu.Z_c + \alpha.Y_c - \beta.X_c + \Gamma.0 + Z_o - Z_T &= 0
\end{aligned}
$$

$$
\begin{vmatrix}
1 & 0 & 0 & X_c & 0 & Z_c & -Y_c & (X_o - X_T) \\
0 & 1 & 0 & Y_c & -Z_c & 0 & X_c & (Y_o - Y_T) \\
0 & 0 & 1 & Z_c & Y_c & -X_c & 0 & (Z_o - Z_T)
\end{vmatrix}
\cdot
\begin{vmatrix}
T_x \\ T_Y \\ T_z \\ d\mu \\ \alpha \\ \beta \\ \Gamma \\ 1
\end{vmatrix}
$$

Par point 3 lignes et 8 colonnes

(8X1)

$$
\begin{vmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{vmatrix}
\leftarrow
\begin{vmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{vmatrix}
+
\begin{vmatrix} T_x \\ T_Y \\ T_z \end{vmatrix}
+ [R = e^{A\theta} = I + A.\sin\theta + A^2(1-\cos\theta)].(1+d\mu).
\begin{vmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z \end{vmatrix}
$$

Avec $tg\ \theta = \sqrt{\alpha^2+\beta^2+\Gamma^2}$ Les inconnues sont numérotées de 1 à 8 dans l'ordre du vecteur des inconnues donné ci-dessus

Pour chaque point d'appui, terrain ou sommet perspectif, on écrit également trois équations linéarisées en X, Y, et Z, exprimant que les coordonnées approchées de ces points seront égales, après application d'une petite similitude dans l'espace, aux coordonnées terrain ou aux coordonnées G.P.S.

Les calculs, qui traitent simultanemment ces deux series d'équations, sont poursuivis jusqu'à convergence, ils s'appliquent à tous les éléments qui seront introduits dans la compensation finale.

3. TROISIEME PHASE.

a.FORMATION DIRECTE DE LA MATRICE NORMALE.

On a pris l'habitude d'appeler grande inconnue la position d'un sommet perspectif ou d'un point, on traite ces inconnues comme un scalaire alors qu'il s'agit d'un vecteur 3X1 pour un point, et 6X1 pour un sommet, soit Xm, Ym et Zm, pour les premiers, et Xs, Ys ,Zs et Ω ,ø et K, pour les seconds, par un abus de langage bien normal, on dit une inconnue de point ou une inconnue de faisceau, les coordonnées elles-mêmes et les paramètres d'attitude, pris individuellement, sont appelés petites inconnues.

La manipulation des paramètres d'attitude Ω,ø et K, impose de s'en tenir à la matrice de rotation 3X3 appelée R avec:

$$R = \begin{vmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r31 & r32 & r33 \end{vmatrix}$$

qui est mise à jour à chaque itération par la prémultiplication par une petite matrice dR calculée à partir des véritables inconnues α,β,et Γ, qui sont des quantités petites; les véritables inconnues du calcul sont, toujours, des petites quantités:

un vecteur 3X1 dx_m pour les points de terrain

et un vecteur 6X1 dx_s
$d\alpha_s$ pour les sommets.

Les principes ,les méthodes de calcul, les procédures de compensation, sont communs à la Géodésie et à la Photogrammétrie.

Une relation cliché lie deux inconnues, l'inconnue de point et l'inconnue de faisceau soit, avec le terme de second membre, que l'algorithme de résolution de CHOLESKI, permet de traiter exactement comme les inconnues, neuf inconnues, par équation; la relation cliché mobilise, également, les termes qui corrigent les observations, et les inconnues qui multiplient les éléments des polynômes des systématismes de DUCLOUX, au nombre de cinq par bande. Au total une relation cliché, qui est la base de tout le calcul, comporte quinze termes et quinze petites inconnues, du moins était-ce le cas dans la version du programme FAISCEAUX en usage à l'I.G.N. jusqu'ici. L'utilisation de mesures aéroportées a imposé d'augmenter ce nombre, la création d'inconnues supplémentaires étant nécessaire pour les placer dans le référentiel des points du terrain.

Lorsqu'on utilise des mesures aéroportées ce nombre est augmenté de:

Une inconnue laser,

Une inconnue statoscope, peut être deux, suivant le modèle fonctionnel adopté, et si on prenait en compte ou non les dérives dans le temps de ces inconnues leur nombre serait, évidemment, doublé.

Trois inconnues de G.P.S, pouvant être portées à sept, si on tenait compte d'une similitude dans l'espace $\mathbb{R}^3$, elle serait, soit complète, soit réduite à trois translations, ou ,encore , à dix inconnues, si on prenait en compte les dérives dans le temps de ces paramètres , ou à six si on se contentait de trois translations, et de leurs dérives dans le temps; les rotations étant,en général, très petites, en première approximation on les avait ignorées, et négligé, aussi, leurs variations dans le temps qui seraient, évidemment, encore plus petites; par contre, pour de très grands chantiers, et pour des valeurs de G.D.O.P. élevées, cette position devrait, peut-être, être révisée surtout si on n'utilisait qu'un seul récepteur.

La dépendance entre le nombre d'inconnues des relations d'observation et les modèles adoptés pour les mesures aéroportées crée un problème, non résolu, dès les premiers pas du calcul, en effet:

L'observation d'un point sur un cliché génère deux équations d'observation ,une en x, l'autre en y.

Une mesure G.P.S., qui n'est pas à proprement parler une observation, génère trois équations comme, d'ailleurs, chaque point d'appui, ces derniers avec les mêmes réserves.

Une observation laser génère une équation ,

Une observation statoscope génère, aussi, une seule équation.

Actuellement le programme n'est pas en mesure de prendre en compte toute la diversité des situations qu'on peut rencontrer, résultant de l'utilisation simultanée de plusieurs catégories de mesures aéroportées, et des modèles de ces mesures, répondant aux conditions particulières, très variées, dans lesquelles elles ont été faites.

b.CLASSEMENT DES SOMMETS PERSPECTIFS.

En troisième phase on classe les sommets perspectifs de manière à ce que la matrice normale qui sera stockée n'emprisonne que le moins de zéros (0) possible, c'est-à-dire à ce qu'elle soit réduite à ses termes non nuls, et aux termes nuls qui seraient inclus entre deux termes non nuls, par l'algorithme de stockage. L'idéal serait de stocker une matrice normale tassée autour de sa diagonale principale avec des colonnes de termes pour les inconnues auxiliaires et le second membre aux bords. Depuis que le calcul matriciel à été rendu possible par la mise en oeuvre d'ordinateurs, on a recherché les moyens les plus performants pour assurer un stockage des matrices normales en statistiques, des matrices de rigidité pour les calculs de mécanique des structures, éléments finis etc..demandant le moins de place possible en mémoire. Tout au début, dans les années 60, lorsque ce type de calcul a été rendu possible par les progrès des calculateurs électroniques, cela se faisait

manuellement, avec de très bons résultats, lorsque le système n'était pas trop volumineux.

Il ne saurait donc être question de développer ce sujet qui a fait l'objet d'études très poussées, et de progrès importants, depuis presque trente ans, on décrira simplement le procédé employé par le programme FAISCEAUX qui, d'ailleurs, est bien connu sous le nom d'algorithme "du banquier", lequel date de 1976 et a remplacé l'algorithme direct ou inverse de CUTHILL-Mc KNEE, plus ancien.

Cet algorithme est conçu en fonction de la résolution ultérieure du système par la méthode de CHOLESKI, c'est pourquoi le stockage se fait par colonnes, il convenait donc que les colonnes soient pleines de termes différents de zéro (0).

La matrice étant symétrique, on ne stocke que sa partie triangulaire supérieure, par conséquent les colonnes ayant le moins de termes significatifs ont intérêt à être stockées les premières, et les premières inconnues devront être les moins liées aux autres, car, dans le cas contraire, les premières lignes seraient pleines, et emprisonneraient des colonnes dont les termes situés "plus bas" seraient des zéros "captifs". A l'inverse, on place aux derniers rangs les inconnues qui ont le plus de voisines, c'est-à-dire à la partie inférieure de la diagonale principale, dont le dernier terme, qui est la somme pondérée des carrés des résidus, est surmonté d'une colonne pleine.

L'algorithme du banquier a été décrit par SNAY en 1976 [65], qui illustrait son propos en imaginant qu'un riche philanthrope avait décidé de partager son domaine entre ses métayers, à la condition qu'ils aient, au préalable, réglé leurs dettes, et mis fin à tous les différents qui les opposaient. Il chargeait son banquier de régler les différents, puis d'attribuer les terres, et ce dernier cherchait le moyen de faire ce travail de façon telle que le temps perdu en attentes, par les métayers, dans son bureau, soit minimal. Il démontrait que le banquier devait servir les premiers ceux qui avaient le moins de différents avec les autres .

La terminologie de l'algorithme s'inspirait de l'anecdote, c'est pourquoi on l'a rappelée ici. Si les métayers correspondent aux sommets d'un graphe, il existe un différent entre deux familles si elles sont réunies par un coté; un métayer n'attend pas dans le bureau du banquier, s'il n'a aucun différent avec ceux qui ont été servis avant lui; si le métayer j a un différent avec le métayer i il attendra j-i jours, si i est la première famille servie ayant un différent avec j , et si le banquier attribue un lot par jour, par conséquent, la hauteur de la colonne Pj du sommet j est le temps d'attente de cette famille. Le profil de la matrice correspond donc au temps total d'attente des métayers.

Si on suppose que le banquier avait déjà servi k familles, et qu'il restait dans son bureau a métayers "aspirants", c'est-à-dire a familles qui avaient eu des différents avec au moins une des k métayers, qui avaient déjà reçu un lot de terre, le banquier deciderait de servir la famille i pour laquelle Ri, le nombre des métayers qui devront revenir le lendemain, si la famille i était servie, serait minimum.

Ri= a + Mi -Ni

Mi était le nombre de familles ayant un différent avec i et qui n'étaient pas encore dans le bureau du banquier.

Ni était égal à 1 si i était dans le bureau du banquier c'est-à-dire aspirant, et 0 dans le cas contraire.

Quand la matrice associée au graphe est ordonnée selon l'ordre d'attribution des lots la quantité minimisée Ri est égale au nombre des termes hors diagonale des k+1 lignes dans la nouvelle matrice qui doivent être stockés; Ri est égal à la modification apportée au profil de la colonne en attribuant au métayer i le nombre k+1.

ALGORITHME

1 On part donc d'un sommet, dont le choix fait l'objet d'un second algorithme, on le numérote 1.

2 Tout sommet non numéroté ayant un terme hors diagonale commun avec 1 est noté "aspirant" jusqu'à ce qu'il soit numéroté.

3 Tous les sommets ayant un terme hors diagonale principale en commun avec ce sommet ou avec un aspirant est noté "candidat" sauf s'il est déjà numéroté ou s'il est déjà candidat.

4 Si la liste des candidats est vide, on arrête : le classement est fini.

5 Si k sommets sont numérotés on choisi, dans la liste des candidats, pour k+1ème sommet, celui pour lequel Mi-Ni est minimum. Mi est égal au nombre de sommets non numérotés ayant un terme hors diagonale commun avec i("voisins") mais qui ne sont pas des "aspirants". Ni=1 si i, qui est "candidat", est aussi "aspirant".

6 Le sommet i est retiré de la liste des candidats et de celle des aspirants.

7 On retourne en 2

L'algorithme utilisé dans FAISCEAUX s'inspire de celui décrit par SNAY , sauf dans le choix du premier sommet à classer qui est dû a MM.EGELS et DAYET.

Les sommets classés sont d'abord les sommets perspectifs, qui ne sont liés entre eux par un terme hors diagonale, de la matrice normale, qu'après <u>résolution partielle,</u> car ils n'ont aucune relation de liaison directe avant cette résolution, ils ne sont reliés, que de façon indirecte, par les points qu'ils ont en commun, puis par les inconnues de systématisme, enfin par les inconnues de modélisation du statoscope, du laser et de G.P.S.

Pour simplifier on appelle <u>voisines</u> des inconnues, sommets ou autres qui ont, après résolution partielle, un terme hors diagonale principale en commun, même si ce voisinage n'a pas toujours le sens de proximité géométrique qu'on lui donne; si la proximité géométrique entre deux clichés, qui ont des points communs, est évidente, on doit la généraliser à des clichés éloignés qui ne sont "proches"que par des relations qu'ils partagent avec d'autres inconnues.

Pour démarrer l'algorithme les dix sommets, ou inconnues, classés les premiers, seront ceux qui ont le moins de voisins, puis on partira de l'inconnue la plus éloignée de la

première classée, enfin on partira de la plus éloignée de cette dernière. C'est en quoi l'algorithme utilisé dans FAISCEAUX diffère de celui proposé par SNAY, dans son mémoire original.

Au total l'algorithme sera répété douze fois, et on choisira la solution donnant le meilleur profil. S'agissant d'une méthode heuristique, on procède simplement par tâtonnements systématiques.

Le choix des premiers sommets classés ou des premières inconnues pour mettre en route l'algorithme décrit étant fait parmi ceux ou celles qui ont le moins de voisins, c'est parmi les trois ou quatre premiers parcours que se trouve la meilleure solution ce sont, lorsque le vol a été mené normalement, les clichés d'angle du bloc.

En plus des inconnues de sommet on classe:

a/ Les inconnues de systématisme étudiées et mises au point par M.DUCLOUX [66] elles sont au nombre de cinq par bande.

b/ Les inconnues G.P.S.éventuelles lorsque ces mesures sont faites à bord de l'avion; on a choisi, dans un premier temps, trois inconnues par bande représentant trois translations, ou sept inconnues par bande si on veut modéliser complètement une similitude dans l'espace IR^3, il faudrait entrer, éventuellement, les dérivées par rapport au temps soit des trois translations seules, soit des sept paramètres de la similitude.

c/ Les inconnues de statoscope, une par bande, une par chantier serait, parfois, suffisante.

d/ Une constante laser pour tout le chantier; cette constante devrait pouvoir être éliminée ultérieurement, lorsque la technologie de la mesure le permettra.

D. COMPENSATION GLOBALE DU SYSTEME PAR LES MOINDRES CARRES:PROGRAMME DIT"CALCUL DES FAISCEAUX".

Ce programme se distingue essentiellement de la méthode de calcul dite " par modèles indépendants" par le choix des inconnues.

Dans le programme de calcul par modèles indépendants, les inconnues, au nombre de sept par modèle, c'est-à-dire par couple stéréoscopique, sont les paramètres d'une similitude dans IR^3.

A l'inverse, dans le programme de calcul par faisceaux, les inconnues sont les coordonnées du sommet perspectif, les matrices 3X3 d'attitude des sommets, les coordonnées des points, les inconnues de systématisme, les inconnues des mesures aéroportées (voir 1a/,b/,c/,d/.ci-dessus).

L'intérêt du calcul par faisceaux tient, en plus des avantages signalés plus haut pendant les opérations de "préparation, au traitement très différent des points observés sur plusieurs modèles; dans le cas du calcul par modèles indépendants on obtient, nécessairement plusieurs solutions indépendantes venant d'intersections prises deux à deux, on perd ainsi le bénéfice des intersections sur un même point, prises dans leur ensemble, chaque "visée" étant un élément du faisceau de "visées"

convergeant vers le point à déterminer, et non attachée, spécialement, par paire, à un couple et à une bande.

1.VUE D'ENSEMBLE.

La compensation par les moindres carrés est composée d'une suite de calculs formant une itération, au cours de laquelle, à partir des éléments approchés du calcul précédent , ou des calculs de préparation, on détermine les corrections à leur apporter, pour approcher la solution; laquelle serait atteinte en une ou deux itérations, s'il n'y avait pas de fautes dans les observations.

Si on donne l'indice c pour les quantités calculées et m pour les quantités mesurées les résidus d'ajustement sont les suivants:

$$\begin{cases} rx = xm - xc \\ ry = ym - yc \end{cases}$$ pour les résidus-cliché,

$$\begin{cases} rX = Xm - Xc \\ rY = Ym - Yc \\ rZ = Zm - Zc \end{cases}$$ pour les points d'appui ou les points G.P.S.

Ces valeurs seront utilisées comme second membre de l'itération suivante on pose:

$$N.s = 0$$

avec N matrice normale complétée comme on verra
et s solutions,

si on note par v le vecteur résidus du tour de calcul précédent:

$$\begin{vmatrix} \sqrt{p}.A^T/\sigma_o \ (uXn) \\ \sqrt{p}.v^T/\sigma_o \ (1Xn) \end{vmatrix} * [\ \sqrt{p}.A/\sigma_o \ (nXu),\ \sqrt{p}.v/\sigma_o \ (nX1)]$$

La matrice $A^T.p.A/\sigma_o^2$ est augmentée d'une ligne et d'une colonne , le dernier terme de la diagonale principale étant la somme des carrés des résidus on verra plus loin que c'est ,aussi, une mesure de l'énergie emmagasinée, ce nombre étant sans dimension.

$$N = 1/\sigma_o^2 * \begin{vmatrix} A^T.p.A & p.A^T.v \\ p.v.A^T & p.v^T.v \end{vmatrix}$$

On résout :

$$N^{-1} * s = 0$$

Les solutions s corrigent les dernières valeurs calculées des inconnues, on en recalcule de nouvelles, jusqu'à ce que les solutions s soient nulles. Bien que celà paraisse paradoxal, on ne calcule jamais les coordonnées à partir des mesures, comme on le fait au niveau de la préparation, mais les mesures à partir des éléments approchés du tour précédent, afin de vérifier qu'ils correspondent aux mesures faites aux tolérances près. C'est d'ailleurs le cas de tous les calculs visant à compenser des mesures.

Par ailleurs, le programme FAISCEAUX calcule, d'abord, les coordonnées des sommets perspectifs, en sorte qu'on pourrait dire, par abus de langage, qu'on se relève d'abord sur les points d'appui, puis qu'on intersecte les points de terrain à partir des sommets perspectifs relevés en premier, mais les équations d'observations, telles qu'elles sont posées, font que la solution est simultanée, même si la résolution se fait, pour des raisons d'économie de place en mémoire centrale, en deux temps, par élimination des inconnues de points, puis par la résolution du système réduit aux sommets perspectifs et, enfin, par le calcul des corrections à apporter aux coordonnées approchées des points.

Cette méthode, dans son principe, mais pas dans ses détails de mise en oeuvre, est préconisée depuis plus de vingt ans, sa mise au point résulte de la mise à disposition de systèmes informatiques plus performants, ce qui réduit le mérite de ses premiers promoteurs qui étaient ceux qui pouvaient en disposer, chaque pays a fait comme s'il ignorait, peu ou prou, ce qu'avaient fait ses voisins avant lui, les auteurs Anglo-Saxons préférant largement l'autocitation à la lecture des auteurs Européens, ces derniers leur rendant bien leur superbe ignorance [29 BROWN 67 HEINDL]

La plupart de ces articles est rédigée de telle sorte qu'on ne puisse rien en tirer, car ce sont, en grande majorité, des descriptions de principes déjà connus, parfois appliqués à d'autres domaines, comme la mécanique des structures ou les éléments finis, qui ne risquaient pas d'aider la concurrence!

2.LES EQUATIONS D'OBSERVATION.

Les équations d'observation sont, comme on l'a vu, de deux types:

Equations tirées des observations des clichés, dites mesures internes.
Equations d'appui, ou de G.P.S., ou de laser, ou de statoscope, dites mesures externes.

On a vu, aussi, l'apport, en cours d'étude, des systématismes DUCLOUX qui entraînait une modification des relations internes des clichés en libérant certaines liaisons, pour en créer d'autres, correspondant au modèle fonctionnel retenu.

Les coefficients des inconnues sont les dérivées partielles de l'équation non linéaire, par rapport à l'inconnue en question [ANNEXE III]. L'équation des clichés est le calcul

des coordonnées clichés des points à partir des coordonnées approchées, des points du terrain et des sommets perspectifs, c'est une relation homographique qui n'est, bien sûr, pas linéaire, elle est dérivée par rapport aux inconnues, qui sont les coordonnées des points, des sommets, des attitudes, des systématismes DUCLOUX, et des inconnues crées par les modèles des mesures aéroportées; les corrections à apporter aux coordonnées approchées sont les solutions des équations linéaires obtenues par dérivation, au dernier point approché, du moins dans le principe, car le programme FAISCEAUX a pris quelques libertés, en substituant au point approché terrain les coordonnées terrain des points d'appui, ce qui, selon M.Ph HOTTIER , fausserait les résultats statistiques. Toutefois cette situation, gênante pour certaines simulations, n'est absolument pas plus critiquable, dans son principe, que le calcul des variances à l'aide de formules linéarisées, de relations qui ne sont pas linéaires, à chaque itération, qui ne serait pas la dernière, on calcule des résidus moyens quadratiques qui seraient faux; en pratique cela n'est jamais gênant.

Ces dérivées partielles sont calculées de deux façons, chacune visant un emploi particulier:

La première manière vise seulement à calculer les variances et covariances, c'est celle qui est citée dans tous les ouvrages et dans toutes les publications, elle ne permet pas de calculer les appoints aux coordonnées approchées, car les dérivées ne font intervenir que les coordonnées clichés, elles ne suivent donc pas les variations des coordonnées inconnues à chaque itération comme il le faudrait.

Elles ne sont pas utilisables en dehors des études théoriques pour lesquelles elles ont été établies, on les a utilisées pour faire les simulations sur des blocs idéaux pour lesquels on voulait éviter de créer des listes de coordonnées terrain; on s'est donné des coordonnées clichés, les mêmes d'un cliché du bloc à l'autre, il a suffit d'ajouter neuf nombres suivant les combinaisons des clichés et des bandes pour créer des blocs artificiels sans autres limites que celles des mémoires des machines.

On trouve moins souvent la seconde dans les ouvrages de référence; elle est utilisée dans les programmes de calcul des blocs comme FAISCEAUX: On a adopté les notations de Y.EGELS et D.KIRSNER utilisées dans [68].

Les relations aux coordonnées clichés s'écrivent [ANNEXE III] et [68]:

$$p/u_3^2.V.R.(dS-dM)+p/u_3^2.V.R.\hat{}A.dA -V/u_3 .xi =0$$

avec p focale conventionnelle minimisant les écarts de distorsion de l'objectif.

$$U=\begin{vmatrix} u_1= r11.a1 + r12.a2 + r13.a3 \\ u2= r21.a1 + r22.a2 + r23.a3 \\ u3= r31.a1 + r32.a2 + r33.a3 \end{vmatrix}$$

A= M-S coordonnées du point-coordonnées du sommet.

$$A=\begin{vmatrix} a1= X_m - X_s \\ a2= Y_m - Y_s \\ a3= Z_m - Z_s \end{vmatrix}$$

$$\hat{A}= \text{Axiateur de } A = \begin{vmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$R=\begin{vmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r31 & r32 & r33 \end{vmatrix}$$ Matrice de rotation

$$V=\begin{vmatrix} u_3 & 0 & -u_1 \\ 0 & u_3 & -u_2 \end{vmatrix}$$

$$dS-dM=\begin{vmatrix} dX_s & -dX_m \\ dY_s & -dY_m \\ dZ_s & -dZ_m \end{vmatrix}$$

$$V/u_3=\begin{vmatrix} 1 & 0 & -u_1/u3 \\ 0 & 1 & -u_2/u3 \end{vmatrix}$$

$$x=\begin{vmatrix} x \\ y \\ p \end{vmatrix}$$

dS sont les inconnues de faisceau
dM les inconnues de point,
dΩ les inconnues de faisceau en attitude .

Les points d'appui et les points du G.P.S. génèrent des équations beaucoup plus simples:

$dM + X_T - X_M = 0$ soit trois équations de ce type par point connu,et pour les sommets G.P.S.:

$dS + X_{GPS} - X_S = 0$

X_T et X_{GPS} étant les valeurs "mesurées", même si, dans l'un et l'autre cas, ce sont des valeurs issues de calculs de compensation menés en amont, et X_M et X_S étant les valeurs calculées correspondantes.

A chaque tour de calcul la valeur de X_S ou de X_M est modifiée selon la relation:

$X_M \leftarrow X_M + s$ s étant la solution du tour précédent.

On a donné en [ANNEXE III] une démonstration de ces relations, qui est un condensé de ce qu'on peut trouver dans les meilleurs ouvrages, notamment dans le cours de M.Ph.HOTTIER pour les dérivées partielles à partir des coordonnées cliché qui ont été utilisées pour les simulations, et d'un document manuscrit en usage au S.T.N, dû à M.EGELS pour les coefficients des équations d'observation utilisées dans FAISCEAUX, en leur donnant une forme plus accessible.

Les relations d'observation doivent être complétées par les termes provenant du modèle de systématisme de M.DUCLOUX:

T.dD T étant les coefficients des inconnues de systématisme de DUCLOUX dD.

De la même manière ces formules doivent être complétées des inconnues de G.P.S et de statoscope soit:

W.dGPS et L.dSTA, la formule complète, mise en oeuvre dans la version VII du programme FAISCEAUX, sera:

$$p/u_3^2.V.R.(dS-dM) + V.R.\hat{}A.dR + T.dD + W.dGPS + L.dSTA$$
$$-V/u3 .x = 0$$

On trouvera la forme de T dans le document établi par M.DUCLOUX.[40] On évitera donc, non seulement de déflorer le sujet mais aussi d'en faire un exposé nécessairement moins bon que la publication que l'auteur aurait pu faire.

Pour résumer ce qui précède les inconnues seront:

Des inconnues de point dX_M, dY_M, dZ_M.
Des inconnues de faisceau dX_S, dY_S, dZ_S, α, β, Γ.
Des inconnues de bande dD_1, dD_2, dD_3, dD_4, dD_5, dX_{GPS}, dY_{GPS}, dZ_{GPS}, dZ_{STA} et éventuellement dH_{LAS}.

Dont certaines pourraient n'être que des inconnues de bloc. Le rang est, dans l'ordre donné, de 1 à 20, ce dernier rang étant celui du terme de second membre qui représente le résidu:

Calculé - Mesuré, quelle que soit la mesure.

L'utilisation des mesures aéroportées a donc imposé la création de nouvelles inconnues de bande.

3.LE SOUS PROGRAMME "OBSERVATIONS".

a.GENERALITES.

Le sous programme "observations"a pour objet de calculer les coefficients des inconnues, à chaque itération, dans les équations d'observation des clichés; ces coefficients sont désignés par leur rang:

éqx(i) i variant de 1à 15 pour l'équation en x
éqy(i) pour l'équation en y

qui sont les coordonnées clichés notent, respectivement, le coefficient de l'inconnue de rang i dans l'équation en x(cliché) du point, puis dans l'équation en y du même point.

Il est précédé d'une séquence de calcul "corrigeant" les coordonnées terrain de la réfraction atmosphérique et de la courbure de la terre.

On a pensé, dans un premier temps, que ces calculs devraient être affinés avant d'envisager l'utilisation de mesures aéroportées touchant les sommets perspectifs.

En effet, il était couramment admis que les positions des sommets perspectifs pouvaient être entachées d'erreurs systématiques dûes à des corrections de réfraction mal calculées, lesquelles se trouvaient corrigées au moment du calcul des points, puisque les systématismes agiraient, alors, en sens contraire, pour donner des résultats acceptables. Cette correction par retour en sens contraire n'aurait plus été en mesure d'agir si les sommets étaient tenus par des mesures directes. Or, il n'en a rien été, puisque les mesures aéroportées ne définissent la position des sommets, qu'à une constante inconnue près.

Mais avant de connaître les modèles fonctionnels des mesures aéroportées, il semblait impératif de corriger cette partie du programme; on y avait définitivement renoncé lorsqu'il était devenu évident que les paramètres de systématismes DUCLOUX [40] corrigeaient, très bien, ce type d'imperfections, au-delà même du domaine pour lesquels ils étaient conçus!

b.CORRECTION DE COURBURE DE LA TERRE.

Les points d'appui étaient mis dans un référentiel tridimensionnel local par une transformation inverse d'une projection orthogonale; c'est-à-dire qu'on considèrait que les coordonnées des points d'appui auraient été calculées dans un système local, ayant pour origine le barycentre des points d'appui utilisés lors de la phase dite de préparation, pour la mise en place planimétrique, et qu'on appliquait une transformation pour les replacer dans un système tridimensionnel local.

$$X \leftarrow -X + 2.Z.X.C$$
$$Y \leftarrow -Y + 2.Z.Y.C$$
$$Z \leftarrow -Z - C.(X^2 + Y^2),$$

C, étant la courbure de la terre au point barycentrique ou, encore plus simplement, la courbure moyenne.

Une assimilation de la projection utilisée à une projection stéréographique aurait été bien meilleure; on aurait pu considérer une projection stéréographique dont le plan serait, aussi, tangent au barycentre des points de mise en place planimétrique et chercher à calculer:

X X
Y Tridimensionnels locaux à partir de Y de la projection
Z Z

Et de la courbure moyenne de la terre en ce point.

Dans le cas où les appuis pourraient être, exclusivement, des points de G.P.S, il semblerait encore plus simple de transformer les coordonnées tridimensionnelles géocentriques, données par l'appareil recepteurs et le logiciel qui lui est associé, en coordonnées tridimensionnelles locales, sans passer par un système de projection, comme on l'a fait dans les essais qu'on va décrire.

c.REFRACTION ATMOSPHERIQUE.

Les auteurs de FAISCEAUX avaient envisagé deux cas:

1°/ L'avion n'était pas pressurisé, il était donc à la pression atmosphérique qui règnait à l'altitude de prise de vue, on appliquait une expression calculée à partir de l'expression de l'indice de réfraction de l'air en fonction de l'altitude:

$$n/n_o = 1 + a.(H_s - H) - b.(H_s^2 - H^2)$$

expression qui aurait été donnée par SCHUT.

Si on pose:

$$a = \begin{cases} a1 = X_M - X_s \\ a2 = Y_M - Y_s \\ a3 = Z_M - Z_s \end{cases}$$

on remplace a3 par:

$a3 \leftarrow a3 + L^2.(R_1 + R_2.(Z_s + Z_M)/3)$ avec:

$L^2 = a1^2 + a2^2 + a3^2$

c'est le carré de la longueur du rayon lumineux.

2°/ l'avion était pressurisé, la correction de réfraction atmosphérique était considérée comme compensée par la déviation du rayon lumineux entre l'atmosphère extérieure à l'avion et celle qui existait intérieure à l'appareil, et qui était portée à une pression voisine de celle qui règne à, environ, 2.000m d'altitude.

Les températures étaient également très différentes, la température intérieure de l'avion étant de 20°C environ, la température extérieure pouvant être de -23°C à 5.000m.

Les corrections de réfraction s'appliquaient au vecteur a avant l'écriture des équations d'observation cliché.

Il s'agissait donc de corrections très sommaires et, probablement inexactes; ceci était devenu sans conséquences

depuis qu'on utilisait la version du calcul prenant en compte les systématismes de DUCLOUX [40] qui corrigeaient toutes les erreurs du type réfraction.

d.INFLUENCE DES DEUX SYSTEMES DE REFERENCE UTILISES.

Les valeurs des inconnues dX,dY, dZ, des équations d'appui sont données dans le système de projection qui sera aussi le système dans lequel seront obtenus les résultats:

$$M = M_o + dM \text{ et}$$
$$S = S_o + dS$$

à l'inverse les inconnues dX,dY,dZ, des équations clichés seront exprimées dans le système tridimensionnel local.

La confusion des deux systèmes de référence est possible parce les corrections calculées étant des infiniment petits ne sont guère sensibles aux écarts entre le système de projection et le référentiel tridimensionnel local, et que lorsqu'on atteint la solution des moindres carrés les valeurs des inconnues calculées sont, alors, nulles, et ce ,quel que soit le système de référence. On converge donc toujours vers la solution, simultanément, dans les deux systèmes.

Par ailleurs, si les coordonnées elles-mêmes peuvent être très différentes dans les deux systèmes, (projection cartographique pour les points d'appui, et tridimensionnel local pour les relations clichés) les différences de coordonnées, entre points voisins, ne le sont pas, et les différences des différences sont totalement négligeables.

e.NORMALISATION DES EQUATIONS D'OBSERVATION.

On a remarqué que dans les équations d'observation on pouvait avoir jusqu'à 20 inconnues, on devrait donc calculer les 210 termes de la matrice normale par point, si on suivait la méthode décrite par des auteurs Anglo-Saxons.

Les auteurs du programme FAISCEAUX ont préféré écrire un programme standard de normalisation utilisable dans tous les cas

On connaît les coefficients des inconnues des équations d'observations des clichés rangées dans l'ordre indiqué; on les multiplie par $\sqrt{p}/\sigma_o$, σ_o étant exprimé dans la même unité que les coordonnées des clichés afin que les équations soient sans dimensions.

On fait de même avec les autres équations d'observations appuis, G.P.S, laser, statoscope, σ_o étant exprimé dans la même unité que la mesure, qui, pour le statoscope, peut être une tension électrique.

Le rang de l'inconnue dans la matrice normale est défini par un algorithme permettant de "tasser" tous les termes non nuls près de la diagonale principale, sur lequel on ne reviendra pas. Le résultat est un vecteur dans lequel les "grandes inconnues" les moins liées sont classées les premières, la dernière, correspondant au second membre des équations à résoudre, étant toujours pleine.

Pour chaque relation cliché on recherche :
Le numéro du point
Le numéro du cliché
Le numéro de la bande

dans tableau des relations du bloc(10.a) ce qui permet de retrouver leur classement dans la matrice normale par une recherche dichotomique. Le rang de la grande inconnue dans la matrice normale étant connu celui d'une "petite inconnue" se trouve facilement ces dernières étant classées dans un ordre immuable à la suite de la grande inconnue dont le rang est celui de dXM; pour chaque coefficient d'une inconnue on connaît son rang dans la relation d'observation, et sa valeur, le problème reste, après normalisation, de bien placer les produits dans la matrice normale:

```
     XXX        XXXXXX          XXXXXX           X
      XX        XXXXXX          XXXXXX           X
 Point X        XXXXXX          XXXXXX           X
               Termes de liaison
               XXXXXX                           X
                XXXXX           Second          X
                 XXXX           Membre--->      X
Cliché 1          XXX                           X
                   XX                           X
                    X                           X
                           XXXXXX               X
                            XXXXX               X
                             XXXX               X
Cliché 2                      XXX               X
                               XX               X
                                X               X
                  Somme des carrés des résidus-->X
```

Dans une première version du programme, où les sommets perspectifs et les points faisaient l'objet d'une résolution simultanée, il convenait de bien vérifier la position relative des clichés et des sommets, ceci n'est plus nécessaire dans les versions ultérieures, où les grandes inconnues classées se réduisent à celles relatives sommets seuls, ce qui fait gagner beaucoup de place dans la matrice normale qui, ainsi, peut recevoir des blocs de plus grandes dimensions, et ce qui fait gagner du temps au cours de la résolution, qui est, alors, faite en deux étapes.

L'algorithme de normalisation est le suivant:

```
Pour chaque relation
{
        Normalisation(Matrice normale,Pivots, Coefficients de
l'équation en x, Coefficients de l'équation en y, Rang des
coefficients des équations dans le classement des inconnues)
    i=nombre des termes de la relation
    {
    i=1
        j=Nombre des termes de la relation
        {
        j=1
           Rang de i< Rang de j? Rang dans la matrice normale=
```

```
                    Pivot(Rang de j)+Rang de i- Rang de j ]
                    Pivot(Rang de i)+Rang de j- Rang de i
                          ¿
        Coefficient de l'inconnue dans la matrice normale(rang
        de l'inconnue  dans la matrice normale)<--Coefficient
        de l'inconnue dans la matrice normale(Rang de l'incon-
          nue dans  la matrice normale) + Coefficient de
    l'équation en x(i)*Coefficient de l'équation en x(j)
   + Coefficient  de l'équation en y(i)* Coefficient de
   l'équation en y(j)
      } j
   }i
}Relation suivante.
```

(Rang de i - Rang de j) est un entier positif représentant la hauteur de la colonne, c'est-à-dire la hauteur du terme de liaison au-dessus du pivot i ou j.

1er cas Si i= j, c'est le pivot;

2éme cas Si i<j, ou si i>j, la position du terme est celle du pivot de rang le plus élevé moins la hauteur de la colonne; ceci étant simplement dû au mode de rangement des inconnues dans la matrice normale, le rangement des termes se fait de la manière suivante:

```
1 2 4 7  11
  3 5 8  12
    6 9  13
      10 14
         15
            i──────────────────┐
                               │
                   Hauteur=j-i │
                      -------->│
                         j─────┘
```

4. RESOLUTION PARTIELLE PAR ELIMINATION DES INCONNUES DE POINT.

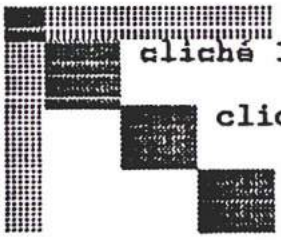
Afin de limiter les dimensions du système à résoudre, qui serait plus volumineux que celui de l'ancien programme de calcul par modèles indépendants, on procède, avant la formation de la matrice normale, à l'élimination des inconnues de points, qui sont les plus nombreuses, dans le même temps, on crée des relations de voisinage entre les sommets perspectifs qui, autrement, n'en auraient pas.

Il s'agit d'une résolution partielle d'un système qui se réduit à une petite matrice, dite matrice auxiliaire, comprenant les inconnues d'un point et des inconnues des sommets d'où ce point est vu, cette résolution ne tient que peu de place.

Les trois premières lignes débutent par les inconnues du point $(dX,dY,dZ)^T$, puis un terme croisé se place au-dessus des inconnues des faisceaux, $(dX,dY,dZ,d\Omega,d\phi,dK)^T$, où le point est vu marquant qu'il existe une liaison entre le point et le cliché,

les termes diagonaux s'ajoutent à ceux provenant d'autres clichés.

POINT....3X3



MATRICE AUXILIAIRE AVANT RESOLUTION

MATRICE AUXILIAIRE APRES RESOLUTION PARTIELLE

L'économie qui est réalisée peut être considérable puisque les points sont, de loin, les inconnues les plus nombreuses.

A la fin de chaque résolution partielle la matrice auxiliaire est entrée dans la matrice normale, où ses termes s'ajoutent aux termes déjà mis en place.

Le programme utilise ,en outre, un artifice tout à fait intéressant tirant avantage de la résolution du système par approximation successives:

On a vu qu'à chaque itération on dispose de valeurs de mieux en mieux approchées des inconnues que l'on ne modifiera que de quantités très petites; les équations d'observation sont écrites dans un système tridimensionnel local, et les solutions sont appliquées comme corrections aux valeurs approchées exprimées dans le référentiel du système de projection. Quand on atteint la solution définitive les résultats des équations linéarisées sont nuls , quel que soit le système de référence.

Le programme reçoit, en entrée, les mesures des coordonnées des points sur les clichés, chaque point a deux mesures, l'une en x, l'autre en y (les minuscules étant généralement réservées aux mesures sur les clichés)10.c; un fichier contenant les coordonnées des points d'appui 10.b; un fichier contenant les coordonnées G.P.S. des sommets perspectifs; un fichier contenant les mesures statoscope; un fichier contenant les mesures laser; enfin un fichier spécial contenant les coordonnées approchées des points, des sommets perspectifs et de inconnues auxiliaires, provenant soit du programme de préparation, soit d'une itération précédente.

Il restitue, en sortie, ce même fichier appelé "faisceaux", mais portant des valeurs corrigées des solutions trouvées, au cours du calcul.

Le calculateur est maître de la décision soit d'interrompre le calcul, et de commander l'édition des résultats, éventuellement sur l'imprimante, soit de reprendre le programme

de compensation à son début, en y entrant comme valeurs approchées, celles qui viennent d'être corrigées, et qui, par conséquent, sont plus proches de la solution définitive.

Le calcul permet aussi, dès le début et à chaque itération, de modifier les écarts-types a priori, et les poids des différentes catégories de mesures, et de reprendre, corriger, voire éliminer les mesures jugées, à tort ou à raison, fausses ou douteuses au cours du calcul précédent, avec, toujours, la possibilité de s'en repentir au début de l'itération suivante.

Cette partie, qui fait l'agrément et l'originalité de ce programme, est dûe à M.Y.EGELS. Sur un plein écran le calculateur voit apparaître, pour le point considéré, les mesures, les valeurs calculées et les données externes du point, quand elles existent; on peut les modifier directement à l'écran, les rendre actives, ou inactives, dans la compensation, et savoir immédiatement, mais localement, l'effet du choix du calculateur, sur lequel il a, ainsi, la possibilité de revenir.

5. CONTRIBUTION DES APPUIS.

Si le point est connu comme appui on fait intervenir sa contribution directement dans la matrice auxiliaire qui se traduit simplement par l'addition par trois termes qui s'ajoutent à ceux qui sont déjà mis en place sur la diagonale principale à la place des coefficients des inconnues de points, des termes sur la même ligne dans la dernière colonne, enfin un terme sur la dernière ligne et la dernière colonne.

6. RESOLUTION DU SYSTEME.

Après résolution partielle des inconnues des points, la matrice normale est réduite à ses inconnues de faisceaux, aux inconnues de systématisme et aux inconnues provenant des modèles des mesures aéroportées, voir L,B ou C, ci-dessus; sa taille est très réduite, il est facile d'estimer l'économie de place réalisée en prenant un cas concret assez courant, qui est celui de la carte de base au 1/25.000ème:

EXEMPLE

Soit quatre bandes de quinze clichés chacunes; les inconnues seront les suivantes:

Inconnues de points, pour les points de liaison entre les clichés seulement: 5 points par cliché soit 300 points et 3 inconnues par point 3X300..... 900 inconnues

Inconnues des faisceaux 6 inconnues par cliché soit
6X60..... 360 inconnues

Inconnues de systématisme DUCLOUX soit 5 par Bande, c'est-à-dire:
5X4..... 20 inconnues

Inconnues du modèle G.P.S:
admettons seulement 3 translations par bande soit:
3X4.....12 inconnues

Inconnues du modèle des mesures du statoscope, admettons une inconnue par bande soit:

.....4 inconnues

Inconnues des points d'appui, environ 40 points soit
3X40..... 120 inconnues

Total 1416

Après résolution partielle: 396 inconnues

La réduction est, évidement, considérable; à l'inverse, ce simple tableau montre que rien n'empêcherait qu'on prenne en compte, dans la compensation, de relations entre les points d'appui, en n'éliminant que les points qui n'ont aucune relation entre eux et qui sont, et de loin, les plus nombreux, les points ayant des relations entre eux seraient calculés en même temps que les sommets, s' ils ne pouvaient pas être éliminés. Toutefois, une des dernières versions du programme FAISCEAUX traite la résolution partielle de points dédoublés, ou des points éclatés en plusieurs sous-points, directement dans la matrice auxiliaire, il serait donc possible de réduire, de la même manière, ensemble plusieurs points ayant des liaisons créees par des mesures faites entre eux, la première application pourrait être d'introduire des différences de niveau des plans d'eau sur les points photogrammétriques des bords des rivières.

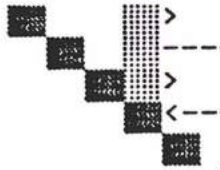
Le système est résolu par l'algorithme de CHOLESKI, autour duquel est organisé le programme FAISCEAUX, cette méthode de résolution dite, aussi, de la racine carrée est basée sur la décomposition de la matrice normale en deux matrices:

$N = A^T.A$	avec
$A^T = M^T.D^{½}$	et
$A = D^{½}.M$	D étant une matrice diagonale.

En identifiant on obtient une matrice unique; pour l'essentiel les termes de la matrice triangulaire sont:

. Pour les pivots

$$\text{Pivot de rang p } mpp = \sqrt{app - \sum_{1}^{p-1} m^2 kp}$$

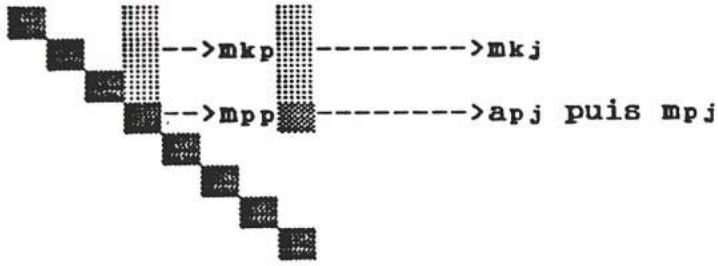


C'est-à-dire que les pivots sont égaux à la racine carrée du pivot initial, moins la somme des carrés des termes qui les surmontent. Comme il existe une indétermination sur le signe du résultat, on convient de choisir toujours les signes positifs devant les radicaux.

.Pour les termes croisés, hors-diagonale principale:

Terme de rang p le reliant à celui de rang j

$$m_{pj} = 1/m_{pp} \cdot (a_{pj} - \sum_{1}^{p-1} m_{kp} \cdot m_{kj})$$



C'est-à-dire que le terme hors-diagonale est égal au terme de la matrice initiale de même position moins la somme des produits des termes de la colonne qui le surmonte par les termes homologues situés au dessus du pivot, divisé par la valeur du nouveau pivot.

.Pour les termes du second membre:

Si on désigne par $m_{1,(n+1)}$ ces termes:
1 représentant la ligne du nouveau vecteur,
n le nombre d'inconnues d'où
n+1 le nombre d'inconnues plus une; les nouveaux éléments, qui prennent la place de ceux du second membre, se calculent comme les termes hors diagonale du premier membre, il est facile de voir que, comme pour la décomposition triangulaire par étapes de l'algorithme de Gauss, la colonne du second membre se calcule de la même manière que les autres, par la formule donnant m_{pj} en faisant:

$j=n+1$ et
$p=1$

A l'issue de la décomposition triangulaire, le dernier terme de la diagonale principale divisant le dernier terme de la dernière colonne, numérotée, dans le programme FAISCEAUX, par nombre d'inconnues plus une (i+1), donne la solution de la dernière inconnue; les inconnues suivantes sont calculées successivement, en remontant. Ceci a pour conséquences suivantes:

.Pour les pivots :

Si un terme de la diagonale principale app est inférieur ou égal a la somme des carrés des termes de la colonne qui le surmonte, la résolution n'est pas possible, car s'il était nul les termes hors diagonale, situés sur la même ligne, deviendraient infinis.

Lorsque le programme FAISCEAUX rencontre une telle situation il donne à m_{pp} la valeur très faible de 10^{-20}, et envoie un message à l'écran, qui prévient le calculateur de l'incident de calcul, et poursuit la résolution.

Cet algorithme, tout à fait classique puisqu'il est implanté jusque sur les calculettes programmables, force une

solution et laisse le calculateur libre de l'accepter, ou de reprendre, et de corriger, si nécessaire, ses données. Lors de la remontée, on se trouve devant la situation, très simple, suivante:

$10^{-20}.\ dX + 10^{20}.(a-\Sigma m.m').c.....=10^{20}.b$ d'où:

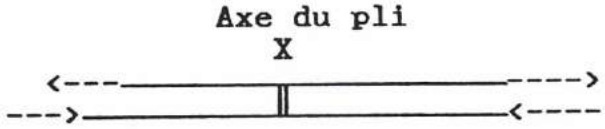
$$dX = b-\sum_{1}^{i-1}(a-\Sigma m.m').ci$$ ou ci représente les inconnues

déjà calculées de la partie inférieure, les autres termes s'expliquant d'eux-mêmes par ce qui précède.

Il n'y a là rien qui soit choquant, on peut simplement regretter que l'algorithme, habituellement utilisé pour la résolution des matrices présentant un déficit de rang, n'ait pas été employé.

Il consiste, devant une situation comparable, à supprimer la ligne et la colonne où se trouve le pivot nul, et de poursuivre la résolution en éliminant l'inconnue correspondante, laquelle reste indéterminée, ce qui est tout de même plus correct.

En ce qui concerne la recherche entreprise, le programme FAISCEAUX, en permettant de continuer le calcul, masque les situations de quasi-singularité; le bloc se conduit, alors, comme un solide en plusieurs parties articulées, qui sont les bandes; les charnières n'étant pas parfaites, puisque limitées par des lignes brisées, en sorte que toute tentative de mobilisation sollicite les bandes dans leur plan, sous forme de cisaillements perpendiculaires au pli; suivant le croquis ci-après:



Pour les bandes du bloc ceci se traduit par un équilibre quasi-indifférent, par contre, dans les situations réelles de la pratique, ceci est évité par la présence des points d'appui, lesquels sont toujours en nombre suffisant pour éliminer les quasi-singularités.

Il est important de noter:

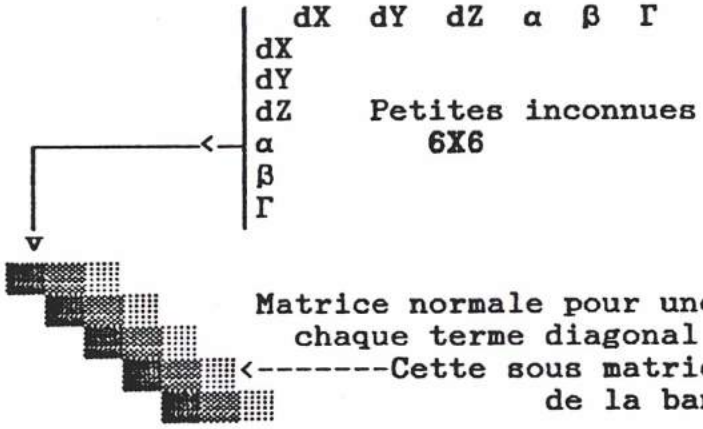
qu'il est inutile de stocker les termes nuls puisque ceux-ci n'interviennent pas dans le calcul,

que les nouveaux termes obtenus au cours de la résolution prennent la place des termes de la matrice initiale et qu'il y a un gain de place considérable en mémoire, d'où l'algorithme du banquier,

qu'en cas d'inversion de la matrice, pour des calculs statistiques ou d'erreurs, par exemple, la matrice inverse étant pleine, l'emploi de cet algorithme est inutile. En

outre il n'est plus possible de n'utiliser que la partie triangulaire supérieure, les termes de la matrice inverse ne peuvent plus prendre la place des termes de la matrice qui restent utiles au cours de l'inversion.

Dans une bande si, après élimination des inconnues des points, on représente les grandes inconnues des sommets par des sous-matrices symétriques définies positives 6X6, la matrice normale est grossièrement pentadiagonale :



Matrice normale pour une bande
chaque terme diagonal 6X6 représente un sommet
<-------Cette sous matrice crée la rigidité
de la bande

Par conséquent on ne mobilise, dans le calcul, que la hauteur d'une colonne soit 18 termes, une résolution "glissante" serait donc possible, elle ne mobiliserait que les termes relatifs à trois sommets seulement . On s'est servi de ce moyen pour les simulations sur bloc ou bande "synthétiques".

Par ailleurs, et seulement pour être complet, il faut signaler que le professeur ACKERMANN, utilise dans le programme de calcul de l'aérotriangulation par faisceaux BINGO, la décomposition de la matrice normale en sous matrices 6X6, car ces dernières sont, aussi, symétriques définies et positives, elles peuvent donc être traitées comme un terme scalaire, dans une méthode de résolution baptisée HyperCholeski, on peut, au prix de quelques complications, encore économiser sur la place nécessaire, en mémoire, pour stocker la matrice normale.

A la fin de la résolution, dans le programme FAISCEAUX, les inconnues des faisceaux, et les inconnues auxiliaires, sont mises à jour par addition des solutions trouvées, aux valeurs approchées de départ, qui ont été calculées, soit en fin de l'itération précédente, soit au cours du programme dit de "préparation", sauf pour les inconnues d'attitude, dont la mise à jour est un peu plus compliquée:

A l'aide des trois solutions trouvées dα, dβ et dΓ, qui représentent les corrections à apporter au attitudes approchées : Ωo,øo et Ko, on forme une matrice de rotation rigoureuse à l'aide de la formule de RODRIGUES [ANNEXE IV], cette matrice 3X3, dR, prémultiplie la matrice d'attitude approchée de la préparation Ro ou de l'itération précédente R_{n-1}:

$$R_n = dR \cdot R_{n-1}$$

Cette complication serait indispensable pour la

poursuite correcte des calculs; la relation approchée, au premier ordre, classique, empêcherait, ou gênerait la convergence des calculs.

7. CALCUL DES INCONNUES DES POINTS.

Comme il n'y a plus d'inconnues de points après la résolution décrite au paragraphe précédent, on recherche, pour chaque point, tous les clichés où il apparaît, on écrit une matrice 3X3 dans laquelle les contributions des différents clichés s'ajoutent, on ne calcule, puisqu'il s'agit d'une compensation, que les corrections à apporter aux valeurs approchées des points déterminées au cours de la préparation ou pendant l'itération précédente; les petits systèmes 3X3 sont formés et résolus, les uns après les autres .

Les coordonnées des points sont mises à jour par addition, aux valeurs approchées, des solutions trouvées après résolution des petits systèmes, point après point.

Les équations pourraient être:

$$\begin{cases} r11.dX + r12.dY + r13.dZ + dx.u3/p = 0 \\ r21.dX + r22.dY + r23.dZ + dy.u3/p = 0 \end{cases} \text{ avec:}$$

$$\begin{cases} dx = x_m - x_c \\ dy = y_m - y_c \end{cases} \quad \text{et}$$

$$\begin{cases} x_c = -p.u1/u3 \\ y_c = -p.u2/u3 \end{cases}$$

x_m et y_m étant les coordonnées mesurées sur les clichés, u1, u2, et u3, étant les valeurs calculées à l'aide des inconnues approchées de la préparation ou du tour précédent.

Comme on dispose, au moins, de deux clichés où le point est vu, les équations sont toujours redondantes (quatre équations pour deux clichés).

Pour les points d'appui il faudrait ajouter une équation d'appui:

$$\boxed{dM + X_T - X_M = 0}$$

8. CALCUL ET EDITION A L'ECRAN DES RESIDUS DES DIFFERENTES MESURES .

On calcule, pour les différentes catégories de mesures, le résidu d'ajustement:

Résidu = valeur calculée - valeur observée

à l'aide des coordonnées des points et des sommets; on fait:

La somme et la moyenne arithmétique des résidus .
La somme des carrés des résidus.
Les résidus quadratiques moyens en divisant la somme précédente par le nombre de degrés de liberté et en prenant la racine carrée du produit de cette division:

$$r^2 = \frac{\text{Somme des carrés des résidus}}{\text{Nombre de degrés de liberté}} \quad \text{avec}$$

Nombre de degrés de liberté= nombre d'observations indépendantes - nombre d'inconnues; et ceci par catégories de mesures.

La version d'origine du programme FAISCEAUX est différente dans son esprit et dans sa forme:

On calcule, globalement, un coëfficient de redondance:

$$F = \frac{\text{Nombre d'observations indépendantes}}{\text{Nombre d'observations indépendantes- nombre d' inconnues}}$$

pour tout le bloc
Et les calculs des résidus quadratiques moyens sont faits, comme suit, par catégorie de mesures:

$$r^2 = \frac{\text{Somme des carrés des résidus.F}}{\text{Nombre des observations}}$$

Si on reprend l'exemple numérique déjà cité en 4.4.8, on aurait:

- Nombre d'observations indépendantes=
  2 X 3 X Nombre de points de liaison entre les clichés
  - 10 points par bande (Pour les points en bout de bande)
  + Points de liaison entre bandes
  + 2 X Nombre d'appui XY
  + nombre d'appui Z
  + nombre de mesures Statoscope
  + 3 X Nombre de mesures G.P.S normales (X2 pour les mesures de G.P.S dégradées)
  + Nombre de mesures Laser;
  soit:

(3 X 2 X(300 -(10 X 4 + 30 (estimation))) +(3 X 40) + 60 +(3 X 60) + 60 = 2160

- Nombre d'inconnues=
  3 X Nombre de points
  + 6 X Nombre de clichés
  + 10 X nombre de bandes(5 systématismes DUCLOUX,
  3 Translations G.P.S, une inconnue statoscope, une inconnue Laser)soit:

3 X 300 +6 X 60 +10 X 4= 1400 d'où :

F= 2160/(2160-1400) ≈ 2,8 la différence entre les deux types de calculs pourrait atteindre √2,8 ce qui est considérable, et très variable selon la catégorie de mesures:

Pour le réseau photogrammétrique, la différence est très faible, dans un cas on a: $1790.\ \sigma^2 /(1790-1400+7) \approx 3\ .\sigma^2$
Dans l'autre : $1790.\ \sigma^2 \times 2,8/1790 \approx 2,8.\sigma^2$

Par contre pour une mesure aéroportée la différence est très importante, comme pour les points d'appui, lorsqu'ils sont peu nombreux:

Dans un cas on a: $120\ .\ \sigma^2 /(120-7) \approx \sigma^2$
Dans l'autre $120\ .\ \sigma^2\ .2,8/120 \approx 2,8.\ \sigma^2$

en se plaçant dans l'hypothèse, le plus souvent vérifiée, où:

$$\sigma \approx \sigma o \text{ et } p=1;$$

Cette différence est dûe, pour l'essentiel, à l'importance du nombre des mesures du réseau photogrammétrique, mesures internes, par rapport au nombre des mesures externes, dont les mesures aéroportées.

La position qu'on a préconisée se justifie par le fait que lorsqu'un réseau est dépouillé de tous ses points d'appui, sauf ceux strictement nécessaires pour définir une similitude dans $\mathbb{R}^3$, la somme des carrés des résidus est nulle et le résidu quadratique moyen est indéterminé de forme 0/0 . Dans le programme normal de calcul il est de 0 X 2,8/7; c'est, évidemment, incorrect.

Avec un seul point en altimètrie (Z) surabondant dans le premier cas on aurait: $\sigma = r/(8-7) = r$;
dans le second on aurait: $\sigma = 2,8.r/8 = 0,35.r.$

La proposition qu'on vient de faire n'est pas, non plus, exempte de défauts, en particulier pour les blocs appuyés sur G.P.S et un seul point d'appui, pour un bloc normal, c'est-à-dire non rigide transversalement, il faudrait, encore, modifier le calcul du nombre des degrés de liberté .

Dans la proposition résultant de l'exemple présenté on a en effet:

Nombre de degrés de liberté=

▪Pour le réseau photogrammétrique:

Nombre de relations tirées des mesures sur les clichés= nombre de points actifs mesurés X 2

2 X Points actifs
- Nombre d'inconnues
+ Nombre minimal de données externes pour que la matrice normale ne soit pas singulière.

C'est ce dernier terme qui pose problème; on distinguera deux cas:

. Bloc homogène Sept paramètres de la similitude. Soit deux points connus dans leur trois coodonnées et un

point connu en altimétrie seulement.

. Bloc normal Deux points connus en planimétrie et en altimètrie plus un point par bande, connu en altimètrie.

▪Pour les points d'appui.

Nombre de relations, une par point et par coordonnée connue soit =
2 X Nombre de points planimétriques
+ Nombre de points connus en altimètrie
- 7(paramètres de similitude) pour le bloc homogène
ou,
- 6 (les deux points connus en planimétrie et en altimètrie.)
- Nombre de bandes (Pour le bloc normal)

▪Pour les mesures aéroportées :
Le nombre des mesures lui-même, moins le nombre minimum de paramètres à déterminer pour placer les mesures dans le référentiel du terrain par exemple, et pour les modèles qu'on a adoptés, trois paramètres de translation pour G.P.S., un paramètre pour le statoscope, un paramètre pour les mesures laser.

Lorsque le nombre des points d'appui est insuffisant, pour que la matrice normale ne soit pas singulière, et, en particulier, dans le cas ou on n'utilise qu'un seul point d'appui réel ou fictif, mais aussi, dans le cas général, et uniquement pour le modèle qu'on s'est donné, il deviendrait nécessaire de calculer le nombre des degrés de liberté de la manière suivante:

▪Pour les points d'appui.

Nombre de relations d'appui, soit une par coordonnée
- 3 (paramètres de translation pour GPS) pour le bloc homogène ou
- 3 (paramètres de translation en planimétrie et en altimètrie)
- Nombre de bandes
+ 1 pour G.P.S, pour le bloc normal.

▪Pour G.P.S:

Nombre de relations faisceaux,soit une par coordonnée connue
- 4 (paramètres de similitude ,échelle et trois rotations non définis par les points d'appui, en nombre insuffisant pour le faire).

En toute rigueur, il n'est pas possible, avec le modèle qu'on a adopté, de faire le calcul en distinguant les points d'appui des mesures G.P.S, les degrés de liberté devraient, par conséquent, être calculés globalement pour l'ensemble de ces données externes, en adoptant la même formulation que celle du

programme FAISCEAUX. Ceci aurait pour avantage, par rapport au mode de calcul d'origine du programme, de ne pas mêler les données externes aux données internes, dont le nombre, beaucoup plus important, fausse le calcul des résidus quadratiques moyens.

Par ailleurs, il existe un moyen très sûr pour calculer de façon correcte les degrés de liberté d'un groupe de mesures, qu'on a seulement effleuré plus haut : il suffit de se placer dans la situation extrême où on a une détermination des inconnues non redondante, la somme des carrés des résidus est, alors, nulle, le nombre des degrés de liberté doit l'être aussi pour obtenir une indétermination de forme 0/0 dans le calcul du résidu quadratique moyen, tout autre résultat serait incorrect.

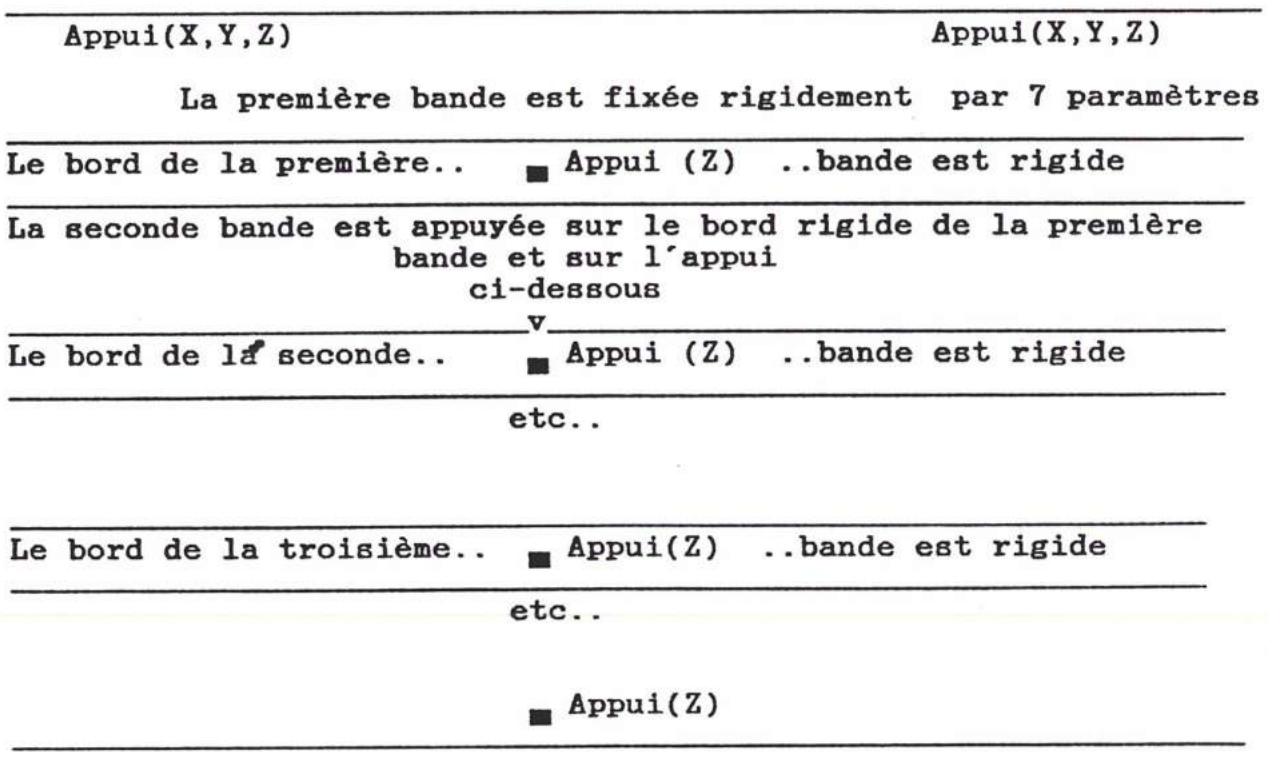
Il suffirait pour cela de reprendre les propositions ci-dessus en faisant:

G= Nombre de relations d'appui et G.P.S/Nombre de relations d'appui ou G.P.S - 7 (Pour le bloc homogène) ou
- 7
- Nombre de bandes
+ 1 (Pour le bloc normal)

et de calculer:

$$\sigma^2 = \frac{\text{Somme des carrés des résidus}}{\text{Nombre des mesures de cette catégorie}} .G$$

La distinction qui est faite entre bloc homogène et bloc normal peut, aussi, se justifier par le schéma ci-dessous indiquant comment un bloc normal, parfaitement articulé, devrait être tenu, pour ne pas être singulier; cette disposition des appuis a été utilisée à ALBERTVILLE et à MANOSQUE.



La rigidité du bloc, dans son plan, étant très grande la transmission de l'échelle se fait facilement, la position des points connus en planimétrie pourrait être, en principe, quelconque, et les deux points connus dans leurs trois coordonnées pourraient être dédoublés, en deux points connus en planimétrie et deux points connus en altimètrie. Il est, bien entendu, préférable que les deux points connus en planimétrie aient, entre eux, la distance la plus grande possible, mais cette condition n'est pas impérative pour que la matrice normale ne soit pas singulière, par contre, elle l'est en matière de transmission d'échelle.

Il n'en reste pas moins qu'il subsiste le problème de la faible rigidité introduite, dans les blocs normaux, par les "charnières" non rectilignes entre les bandes, qui créent une légère redondance, lorsque le nombre des appuis est égal à celui indiqué par le schéma ci-dessus; les résidus ne sont, alors, rigoureusement nuls, lorsqu'on donne cette configuration d'appui minimale, que si les "charnières" sont bien rectilignes, ce qui n'arrive que dans les blocs simulés, mais jamais dans les blocs réels. Il est alors difficile de mettre en accord le nombre minimal des appuis à mettre en oeuvre pour éviter une quasi-singularité et le nombre des degrés de liberté du système qui n'est pas nul; on verra plus loin un exemple spectaculaire du bloc de VICHY privé de ses bandes transversales, appuyé sur un nombre d'appuis insuffisants, et déformé de façon inacceptable au long des bandes centrales, pourtant ce bloc était redondant, en ce sens qu'on obtenait un calcul des résidus sur les appuis non nul, induit par la faible rigidité des charnières!

9. DECISIONS DU CALCULATEUR.

A la fin d'un tour de calcul le réseau est revenu à son état initial, avec, évidemment, des coordonnées approchées améliorées, le calculateur peut commander: soit une nouvelle itération, dans ce cas on est renvoyé en tête du programme dit "de calcul", soit l'édition des résultats sur imprimante, en conservant ou non, le dernier fichier de calcul qu'il vient d'obtenir, en vue d'une reprise ultérieure éventuelle.

Généralement le nombre d'itérations nécessaire est très faible: une, deux, au plus trois seraient strictement indispensables. Les reprises, fréquemment plus nombreuses, ont pour objet la recherche des fautes qui impose la vérification des données externes et éventuellement de calculs extérieurs à la compensation par faisceaux, par un calculateur, de préférence celui qui les avait faits. L'élimination automatique des fautes qui était, d'ailleurs, opérationnelle à été supprimée pour forcer l'intervention de ce calculateur, laquelle doit porter sur la recherche des causes extérieures des fautes. La répétition des mesures n'a pas pour objectif d'améliorer la précision, il existe des moyens moins coûteux pour le faire, mais elle vise à éliminer toutes les fautes. De même, envisager de se servir des mesures aéroportées pour améliorer la précision serait, en partie, chimérique, ces mesures ne seront utilisées que pour remplacer les mesures au sol, soit qu'elles soient impossibles à faire, soit que les mesures aéroportées deviennent plus précises qu'elles, ce qui

sera certainement le cas pour G.P.S lorsque la constellation des satellites sera complète.

10.LES STRUCTURES DU PROGRAMME FAISCEAUX.

Les informations nécessaires au calcul sont regroupées dans des structures qu'on déjà a évoqués en désordre, quand on avait la nécessité de le faire, leur utilité étant, maintenant, évidente, il est possible de les décrire très sommairement:

Ces fichiers sont rangés par familles ayant un pointeur commun, une famille peut donc être représentée par un tableau dont chaque colonne, qui peut comporter des sous-colonnes, porte un nom de fichier.

a.LE TABLEAU RELATIONS.

Ce tableau regroupe tout ce qui a trait aux mesures faites sur les clichés sous un pointeur commun à tous ces fichiers:

1°/ Les relations du bloc comportent deux colonnes
1. Le numéro interne du point observé
2. Le numéro interne du cliché ou le point est vu par

exemple: Point i cliché j
Point i cliché k
Point i cliché l
.....etc

2°/ Les codes d'activité, pour savoir si la relation interviendra ou non dans le calcul, sur une seule colonne .

3°/ Les coordonnées x et y du point mesurées sur les clichés et corrigées, portées sur deux colonnes.

Ce qui restitue les têtes des colonnes du tableau Relations

Numéro Point	Numéro cliché	Actif/Inactif	Coordonnées cliché	
			x	y

b.LE TABLEAU POINTS.(sous-entendu des points connus au sol)

Il regroupe sous un même pointeur tout ce qui a trait aux points, ce pointeur est le numéro <u>interne</u> du point connu dans le premier fichier ci-dessous:

1°/ Numéro des points, ce sont les numéros <u>externes</u> des points triés par ordre croissant, ce tri <u>fixe</u> le numéro interne servant de pointeur au tableau précédent 4.4.12.1

2°/ Code du point c'est un code interne qui permet de savoir si le point est:
Actif/Inactif
Appui/Contrôle
Simple/Dédoublé

3°/ Fichier à trois (3) colonnes contenant les coordonnées du point réduites au barycentre des points ayant servi à la mise en place planimétrique.

4°/Fichier qui indiquait le classement du point en tant qu'inconnue ce fichier est sans objet dans les versions du programme qui éliminent les inconnues de point.

c.LE TABLEAU CLICHÉ.

1°/ Numéro du cliché, c'est le numéro externe des clichés triés par ordre croissant, ce tri fixe le numéro interne du cliché évoqué en 4.4.12.1(relations)

2°/ Code du cliché

0 sans réfraction atmosphérique(avion pressurisé)

1 avec réfraction atmosphérique

3°/ Sommet du cliché lequel donne, sur trois colonnes, les coordonnées des sommets perspectifs des clichés, dans le référentiel du chantier rappelé ci-dessus.

4°/ Rotations (attitude) du cliché qui donne,sur neuf (9) colonnes les termes de la matrice 3X3 permettant de passer du référentiel terrain au référentiel cliché.

5°/ Classement du cliché en tant que grande inconnue.

6°/ Numéro de la bande à laquelle appartient le cliché.

d.AUTRES STRUCTURES.

Afin d'alléger, le principe de l'organisation des fichiers étant toujours le même, on va citer les autres tableaux en indiquant seulement, de quels fichiers ils sont composés:

4.TABLEAU DES BANDES.

Nom
Focale
Numéro de chambre
Distorsion de la chambre, le champ étant divisé en zones concentriques.
Pas de l'étalonnage
Nombre de valeurs de l'étalonnage.

5.TABLEAU DES SYSTÉMATISMES.

Numéro du systématisme
Paramètres de systématismes.

6.TABLEAU DES APPUIS;

Numéros
Codes
Coordonnées.

7.TABLEAU DES INCONNUES

Numéros
Classement optimal
Sommet de colonne

8.TABLEAU DE LA MATRICE

Pivots
Sommets de colonnes

9. MATRICE NORMALE.

Les termes sont stockés comme un vecteur unique

10. MATRICE NORMALE AUXILIAIRE.

Identique à la précédente mais, évidemment, plus petite.

OBSERVATOIRE DE PARIS

Des problèmes de circulation de l'information entre les différentes structures se posent parce qu'un point observé crée deux relations cliché, qu'il appartient à un cliché qui appartient lui-même à une bande, qu'il peut être un appui ou non etc...on recherche le moyen de passage le plus judicieux et le plus court d'un tableau à l'autre. Comme on l'a vu, il existe toujours un paramètre qui permet, au prix d'une recherche dichotomique, d'accéder au pointeur et de passer d'un tableau à l'autre.

La seule difficulté qui existe, pour bien maîtriser le programme FAISCEAUX, vient des problèmes posés par la circulation de l'information entre les différents fichiers appartenant à des tableaux différents, et dans l'accès à l'information nécessaire à un calcul, à partir des paramètres disponibles, qui ne sont pas toujours compatibles avec le choix fait, par exemple il faut à partir d'une colonne d'un tableau pour accéder au pointeur d'un autre tableau.

ANNEXE IV.DESCRIPTION DES MISSIONS D'OBSERVATIONS EXPLOITEES

A. GENERALITES

On décrira, dans cette ANNEXE, les missions d'observation qui ont été faites en utilisant plusieurs capteurs, à ce titre elles auraient dû être répétées dans chaque chapitre de l'exposé traîtant de l'utilisation de un ou de plusieurs capteurs combinés, c'est pourquoi on a préféré les reporter en annexe. On ne reviendra pas sur les chantiers déjà décrits dans le texte principal et qui ne traîtent que de l'utilisation d'un seul capteur utilisé seul.

B. CHANTIER STATOSCOPE SEUL.

Il s'agissait d'un chantier de production utilisant, en dehors du domaine purement expérimental, pour la première fois à l'I.G.N., un statoscope pour mesurer de façon simultanée l'altitude de la chambre de prise de vue au cours du vol, mettant à profit les expériences des vols antérieurs.

Ces vols se sont échelonnés au cours du mois de Septembre 1987 entre le 3 et le 18, ils avaient pour objet de dresser une carte au 1/25.000ème de la partie de la GUYANE dénommée BLOC de SAINT-LAURENT. Le projet initial était d'utiliser un récepteur G.P.S. au cours de ce vol mais, hélas, les heures favorables de réception des quelques satellites encore utilisables se situaient vers 2 h du matin! Il fallut donc se contenter de mesures d'un capteur de pression: le CROUZET 44, qui avait donné des résultats très satisfaisants lors du vol de la Souterraine, décrit ci-après, au cours duquel il avait été associé à des mesures laser simultanées.

La région survolée était couverte d'une forêt équatoriale dense, simplement parcourue par quelques pistes créées par les forestiers pour le débardage des grûmes, par la route longeant la cote, là où la forêt a été défrichée le plus largement, et par les rivières qui servent à la pénétration de cette zone perpendiculairement à la partie habitée, qui est réduite à la bande cotière.

Dans ces conditions les mesures aéroportées étaient en mesure d'apporter leur contribution maximum.

Les points d'appui avaient été placés là où celà était possible, le long des pistes et le long du fleuve MARONI.

Le vol comportait six (6) bandes observées à une hauteur et à une altitude de 4.590m, l'échelle des photographies était, encore, de 1/30.000ème, et il totalisait 128 clichés.

Les observateurs avaient signalé, à l'issue de la mission, que le capteur de pression avait eu des défaillances au cours du vol, ce qui s'est révélé, hélas ,exact , les mesures étaient toutes mauvaises ou douteuses.

C. CHANTIER STATOSCOPE LASER.

LA SOUTERRAINE

Les chantiers décrits dans le texte principal sous les noms de ARGENTON-BOURGANEUF et MAGNAC-LAVAL-LA SOUTERRAINE ont été repris, en les réduisant à la dimension d'une feuille de la carte au 1/50.000è, et en remplaçant le statoscope défaillant par un capteur de pression CROUZET type 44 , basé sur une mesure physique différente de celle des statoscopes utilisés pour les vols d'A.P.R.

On a appelé ce chantier la SOUTERRAINE, pour le distinguer de ceux décrits dans le texte, il se situe dans la même région que les précédents, et comporte 56 clichés, en quatre bandes observées à l'altitude de 4.700 m, avec la même chambre RC 10, de focale 152 mm.

La troisième bande a dû être partiellement reprise, par suite de la défaillance des trois premiers tirs laser, lors du premier passage, sur environ sa première moitié.

D. CHANTIERS GPS.

1. LES ESSAIS SUR AVION LENT.

Deux vols ont été effectués en 1986 au-dessus de la ville d'Amiens. Le choix du site et de l'échelle résultaient plus de problèmes posés par l'antenne de réception G.P.S. qui faisait une saillie importante sur le fuselage de l'avion, que d'une option guidée par des considérations photogrammétriques.

L'appareil portant cette antenne ne pouvait pas être un avion rapide, comme le MYSTERE 20, en raison des perturbations qu'elle aurait apporté à l'aérodynamique du vol et à la structure de l'appareil lui-même, il s'agissait donc bien d'un vol expérimental pour, d'abord, s'assurer que la réception à bord était possible. Les publications, qui étaient basées sur l'expérience réalisée à l'époque, doutant souvent de cette éventualité, ou y mettant des conditions restrictives telles qu'on pouvait avoir des doutes sur sa qualité, sa continuité, et être très réservé quant aux possibilités d'exploitation ultérieures des mesures [17 MADER CARTER DOUGLAS].

Pour l'initiateur du vol il s'agissait, d'abord, et surtout, d'essayer un moyen d'aide à la navigation. L'exploitation éventuelle des mesures en différé, pour appuyer le bloc photogrammétrique, n'intervenait qu'en seconde urgence.

2. LA ZONE D'ESSAI D'AMIENS.

La zone d'essai était située au Sud de la partie urbaine d'Amiens.

Elle avait été équipée , dans une mission assez ancienne (1983), d'une stéréopréparation en vue d'exploiter une prise de vue au 1/14.500e, puis une mission ultérieure (1985), au 1/6.000è, avait utilisé les coordonnées photographiques du précédent chantier, pour densifier les appuis.

L'échelle des prises de vues associées au G.P.S. était du 1/4.000e, c'est-à-dire que l'équipement au sol était très

léger, en tous cas trop léger, en cas de succès de la tentative , pour une exploitation des mesures à une échelle compatible avec celle des photographies. Ces vols avaient fait l'objet d'une description très détaillée dans [41 BROSSIER & al].

Les deux vols avaient comporté trois bandes, malheureusement les deux dernières étaient décalées transversalement, privant le bloc d'un recouvrement latéral, de telle sorte qu'on a dû utiliser quelques photos, d'une bande ancienne au 1/6.000e, pour assurer la liaison entre ces bandes. Enfin, dans chacun des deux vols quelques clichés avaient été abandonnés, soit parce qu'ils n'étaient pas suffisamment encadrés de points d'appui, ou par ce que la vision stéréoscopique était impossible, le recouvrement longitudinal entre deux photographies consécutives étant inférieur à 50%.

3. AMIENS - 1

Ce vol comportait 88 clichés, en trois bandes, pris à une altitude de 620 à 670 m, dont on a retenu 83 clichés utilisables. On a dû ajouter 11 clichés anciens, au 1/6.000e, pour assurer la continuité du bloc.

4. AMIENS - 2.

Cette mission avait été effectuée le lendemain de la précédente, par suite de la défaillance de l'alimentation électrique de la centrale enregistrant les données d'attitude, que le Service des Activités Aériennes (S.A.A.)de l'I.G.N voulait utiliser afin de fournir, immédiatement, des résultats d'essai en matière de navigation aidée par G.P.S., sans attendre l'exploitation, nécessairement assez longue, par le Service de Photogrammétrie (S.P.H).des photographies qui avaient été prises, par la voie photogrammétrique traditionnelle.

Cette prise de vue comportait 80 clichés, dont 73 seulement avaient été exploités au S.P.H. par suite, comme pour Amiens-1, de la rareté des points d'appui et de mauvais recouvrements longitudinaux des clichés en extremité de bande. On a dû, aussi, "ressouder" le bloc en ajoutant 9 clichés au 1/6.000è, dans la même zone où le S.A.A. avait déjà signalé, la veille, de fortes turbulences (Pont de Metz).

Les clichés au 1/6.000è utilisés étant les mêmes que pour AMIENS-1 on a, par la suite, profité de cette particularité pour établir une comparaison des résultats au niveau des points photographiques communs déterminés de façon indépendante, non seulement au cours des deux vols G.P.S, mais aussi au cours du vol de 1985.

On trouvera le plan-schéma de ce vol sur la figure 30.

241000
242000
243000
592000
593000
594000
595000
596000
597000
598000
599000
600000
601000
602000
164
172

Figure 30

E. CHANTIERS G.P.S. CAPTEURS DE PRESSION ASSOCIES

1. LES ESSAIS SUR AVION RAPIDE.

Les essais sur avion rapide avaient pour double objectif de tester des capteurs embarqués sur le MY-20 à plus grande altitude (environ 5.000m), et d'essayer d'exploiter les mesures en les associant, au cours des calculs, à celles du bloc photogrammétrique, et aux points de terrain, en tenant compte, cette fois, de l'expérience accumulée au cours des vols précédents d'Amiens.

On avait donc utilisé, simultanément, un récepteur G.P.S.TR5-S B de SERCEL et deux capteurs de pression CROUZET type 44 et 2100.

La société SERCEL avait mis au point une antenne de réception GPS pouvant équiper un avion tel que le MYSTERE 20; volant aisément à 5.000 m d'altitude à une vitesse de 600 km/heure, altitude qui , pour une chambre de 152 mm de focale, permettait de faire des prises de vue à l'échelle du 1/30.000e, correspondant aux travaux de la carte de base au 1/25.000e, elles permettraient, sans difficulté, de dresser des cartes régulières au 1/10.000e.

2. LES CONDITIONS DE PRISE DE VUE.

Les essais avaient été largement handicapés, surtout, par le petit nombre de satellites NAVSTAR observables dans des conditions de précision satisfaisantes, avec une dilution géométrique de la précision inférieure à 5 (G.D.O.P.<5), à des heures où les prises de vues photogrammétriques sont encore possibles au point de vue éclairement et longueur des ombres.

Rappelons que la situation actuelle (1988) des satellites NAVSTAR est tout à fait critique, en raison de l'accident survenu à la navette spatiale et des délais imprévus qui ont précédé la reprise du programme, elle serait encore loin de permettre une exploitation normale de ce système au cours d'une prise de vue photogrammétrique aérienne avant plusieurs mois.

D'ailleurs, si la situation avait été normale, le chantier de GUYANE aurait été appuyé sur des mesures G.P.S. aéroportées, associées aux mesures statoscope.

Il était prévu que la situation doive s'améliorer en 1988-1989, mais, hélas, il était aussi prévu de dégrader les données transmises par les satellites.

L'antenne DORNE-MARGOLIN spécialement adaptée et mise au point sur le MY-20 par la SERCEL n'avait été disponible qu'une semaine au cours de laquelle les conditions de réception de G.P.S. étaient favorables pendant, seulement, une heure et demie par jour!. Les conditions de prise de vue étaient, par contre, tout à fait limites; notamment la longueur des ombres était un peu forte et a gêné l'exploitation cartographique des photographies de VICHY.

3. LE VOL DE LUNEL.

Le vol de LUNEL a eu lieu le 19 août 1987 , entre 9h15 et 10h15 civiles, ce qui était, évidemment, très juste pour les conditions d'éclairement et la longueur des ombres (7h15 à 8h15 "solaires"). L'échelle des prises de vues était du 1/30.000ème, la focale était de 152m/m et la hauteur de vol de 4500m.

Pendant le vol trois enregistrements simultanés des mêmes satellites G.P.S. étaient faits :

A NANTES par la SERCEL
A CREIL par le S.A.A.
A LUNEL par le S.G.N.

Le vol comportait sept bandes, dont quatre bandes EST-OUEST; une cinquième bande EST-OUEST avait été observée, en reprise sur la première bande, jusqu'à la première moitié de celle-ci. En effet, il semblait que les premiers enregistrements n'aient pas été faits au début de l'observation de la première bande; le premier cliché bénéficiant d'une mesure G.P.S. était le sixième de la bande; il en était de même pour le statoscope, le premier cliché bénéficiant d'une mesure était le troisième de la bande.

Deux bandes supplémentaires avaient été observées, dans le sens NORD-SUD, au début et à la fin du bloc, afin de le rendre plus rigide transversalement.

A la suite des essais de statoscope et de laser associés sur la feuille de la SOUTERRAINE, sur laquelle on avait pu constater qu'en l'absence de points d'appui en nombre suffisant, le long des bords du bloc perpendiculaire au sens du vol, sa rigidité, (voir [45 MILLION],) était trop faible, et gênait l'utilisation des mesures du statoscope.

A cette occasion on s'était aperçu que les blocs présentant un recouvrement transversal de 20% n'étaient pas assez rigides pour utiliser des mesures aéroportées avec très peu de points d'appui.

On avait donc estimé que la présence d'une bande perpendiculaire au sens du vol "utile" serait en mesure d'entretoiser les bandes longitudinales, et relierait de façon rigide leurs extrêmités permettant ainsi aux inconnues de statoscope d'être correctement déterminées, même sur les bandes ne bénéficiant de la présence d'aucun appui. Voir la figure 31.

4. LE VOL DE VICHY.

Compte tenu du court délai pendant lequel l'antenne G.P.S. était disponible et des conditions météorologiques enfin favorables, le deuxième vol d'essai avait eu lieu le lendemain sur un chantier de production, à Vichy; l'équipement était exactement le même.

Le vol de VICHY comportait six bandes, dont deux bandes transversales comme à LUNEL; la première bande ne bénéficiait d'aucune mesure de G.P.S., il s'agissait très probablement d'un incident affectant l'enregistrement des signaux bruts utilisés pour le lissage du calcul, comme cela s'était déjà produit pendant le vol d'Amiens-I.

730000

740000

750000

760000

160000

150000

140000

Points TERRAIN :

△ en XYZ △

▽ en XY ▽

▭ en Z ▭

544

1:200000

Figure 31

S'agissant d'une mission devant être exploitée dans le cadre des travaux de vocation, la cadence des prises de vues avait été doublée, seuls les clichés impairs ont été exploités; en outre, les prises de vues avaient débordé le cadre de la feuille, il avait, de surcroit, été difficile de raccorder les mesures et les clichés correspondants à ces mesures.

5. LE VOL DE MANOSQUE

Le vol de MANOSQUE a été effectué le même jour et après celui de LUNEL soit le 19 Août 1987 un peu plus tôt mais dans les mêms conditions qu'ALBERTVILLE, c'est-à-dire avec deux capteurs de pression CROUZET et un récepteur G.P.S qui comme la fenêtre favorable était dépassée, ne pouvait plus recevoir que trois satellites.

L'interêt de ce chantier, qui n'était par ailleurs absoluement pas destiné à l'usage qu'on a pu en faire, résidait dans les observations, qui s'étaient poursuivies mécaniquement puisque le matériel était resté couplé à la chambre, sur les trois mêmes satellites qu'à ALBERTVILLE mais beaucoup plus tôt (voir figure 32) entre 10h10 et 10h43 UT, lesquels trois satellites étaient plus hauts et un peu mieux placés qu'à ALBERTVILLE: selon un azimut de 37° pour le 12, de 118° pour le 13, et de 140° pour le 3, les hauteurs au-dessus de l'horizon étant comprises entre 35 pour les deux premiers et 80° pour le 3.

C'était aussi un chantier de production, mais il n'avait pas bénéficié d'une stéréopréparation sur le terrain comme celui d'ALBERTVILLE; on avait donc dû utiliser une autre stéreopréparation très ancienne, ce qui était préjudiciable à la qualité des points au sol s'agissant, encore une fois, de marques végétales ayant évolué dans le temps. En effet la stéréopréparation la plus récente datait de 1975!

Ce vol comprenait quatre bandes de treize photographies soit 52 clichés exploitables pris à une hauteur nominale de 4900m au-desssus du sol, soit à un altitude de 5200m, à bord d'un MYSTERE 20. Les mesures G.P.S et statoscope étaient continues.

6.LE VOL D'ALBERTVILLE.

Le vol d'ALBERTVILLE avait été fait à la suite du vol de VICHY, le 20 Août 1987, sans la moindre intention de l'exploiter au titre des essis des mesures aéroportées, le même jour et, bien sûr, avec le même matériel, c'est à dire le récepteur G.P.S. et les deux statoscopes CROUZET.

Ce chantier de production, lui aussi, appartenait à un bloc beaucoup plus vaste, duquel on avait extrait les quelques bandes qui bénéficiaient encore de la réception des émissions de trois satellites assez mal placés, dont deux étaient trop bas sur l'horizon.

Ce vol comprenait cinq bandes, observées à une altitude de 5.600m, pour une hauteur au-dessus du sol variant entre 4.590 et 4.830m, en fonction du relief assez accidenté qui était survolé; comme précédemment la cadence des prises de vue était doublée, on n'avait utilisé qu'un cliché sur deux. Au total, environ 49 clichés avaient été exploités en aérotriangulation. Voir la figure 33.

900000
910000
920000
90000
80000
70000
Points TERRAIN :
en XYZ
en XY
en Z
inutilise
appui
controle
FR0556-T
ECHELLE 1:200000

Figure 33

ANNEXE V. LES CALCULS D'AEROTRIANGULATION.

A. CALCULS PRELIMINAIRES.

Les calculs ont été menés de la façon suivante :

On a d'abord fait un calcul classique du bloc d'aérotriangulation appuyé sur les points connus au sol, le résultat étant contrôlé, par des points identiques, qui n'ont pas été introduits dans la compensation, et qui, par conséquent, sont totalement étrangers aux résultats (on les appelle points de contrôle).

Dans certains cas on a utilisé tous les points disponibles pour "serrer" le bloc sur le terrain, et obtenir un élément de comparaison plus fiable, notamment pour rechercher les modèles fonctionnels les meilleurs, pour représenter les mesures aéroportées, mais après avoir vérifié la précision qu'on pouvait espérer, en examinant les écarts obtenus sur les points de contrôle.

Par cette approche on a obtenu une appréciation du réseau d'aérotriangulation lui-même, et de la qualité des points d'appui qui, sauf pour les chantier de Vichy de Guyane et d'Albertville, posait toujours problème, s'agissant de points repiqués provenant d'anciennes missions de stéréopréparation dont les limites n'étaient pas les mêmes, et qui avaient dûes être complétées par des points très anciens, qui n'ont pas donné les résultats escomptés; pour la plupart ils ont dûs être "désactivés".

Les mesures aéroportées ne pouvaient être entrées dans les calculs qu'après le choix de modèles fonctionnels appropriés, or ce choix s'est révélé plus compliqué que prévu, même si les résultats paraissent très simples, voire élémentaires, il impliquait qu'on rapproche les mesures brutes des quantités calculées.

En outre, ces calculs préliminaires ont été menés en utilisant deux méthodes :

1/La première n'introduisait aucun paramètre de systématisme de clichés, voir des détails sur les inconnues de systématisme dans [69 EBNER 70 SCHUT 71 KUPFER & MAUELSHAGEN].

2/La seconde, au contraire, mettait en oeuvre cinq paramètres de systématisme par bande, étudiés et mis au point par l'ICG DUCLOUX [41] très différents de ceux cités ci-dessus.

Ces paramètres avaient la particularité de représenter des phénomènes physiques précis qui n'étaient pas présents dans toutes les prises de vues; c'est pourquoi ils devaient être mis en oeuvre dans certains cas, principalement pour les vols au-

dessus de 2.000m d'altitude, lorsque l'avion était pressurisé et lorsque la cabine était chauffée, et inversement ne pas être activés lorsque le vol était fait à basse altitude. Ils se sont révélés souvent efficaces dans les deux cas, mais ceci n'a pas été perçu immédiatement.

Au cours du temps, il est devenu évident qu'on avait intérêt à les utiliser dans presque tous les cas, c'est-à-dire, que les paramètres corrigeaient non seulement les erreurs systématiques pour lesquelles ils avaient été mis au point, mais aussi, probablement, d'autres erreurs non identifiées.

Sauf indication contraire, ce sont les résultats des calculs menés avec cette seconde version qui seront donnés, car ils étaient bien meilleurs.

B.CHANTIERS LASER SEULS.

1.MAGNAC-LAVAL, LA SOUTERRAINE (laser seul).

Sur les points d'appui on avait :

Les résidus d'ajustement étant pris dans le sens défini dans l'annexe précédente avec les aménagements qu'on a apportés au calcul d'origine de FAISCEAUX.

Résidus d'ajustement	r_x = 0,77 m r_y = 0,87 m r_z = 0,59 m	r_m =	0,69 m

Sur les points de contrôle en Z :

Ecart quadratique moyen ϵ_z	= 0,77 m
Ecart moyen arithmétique Z	= -0,06 m
Ecart-Type	= 0,76 m

Les résultats graphiques sont reportés sur la figure 34

2. ARGENTON, BOURGANEUF (laser seul).

Sur les points d'appui on avait :

Résidus d'ajustement	r_x = 0,90 m r_y = 1,01 m r_z = 0,63 m	r_m =	0,73 m

Sur les points de contrôle en Z :

Ecart quadratique moyen ϵ_z	= 0,58 m,
Ecart moyen Z	= 0,13 m,
Ecart Type	= 0,57 m

Les résidus quadratiques moyens des mesures sur les clichés étaient compris entre 5 et 6 µm.

Les résultats graphiques ont été reportés sur les figures 35 et 36.

MAGN. LAVAL LA SOUTER

RESIDUS APRES COMPENSATION SUR APPUIS

500000 510000 520000 530000

140000 130000 120000

Points TERRAIN : Ecarts TERRAIN :

en XYZ

en XY

en Z

inutilise

appui controle actif inactif

ech : 1/100.00

150 cm

ecart altimetrique

150 cm

ecart planimetrique

FR0501

ECHELLE 1:250000

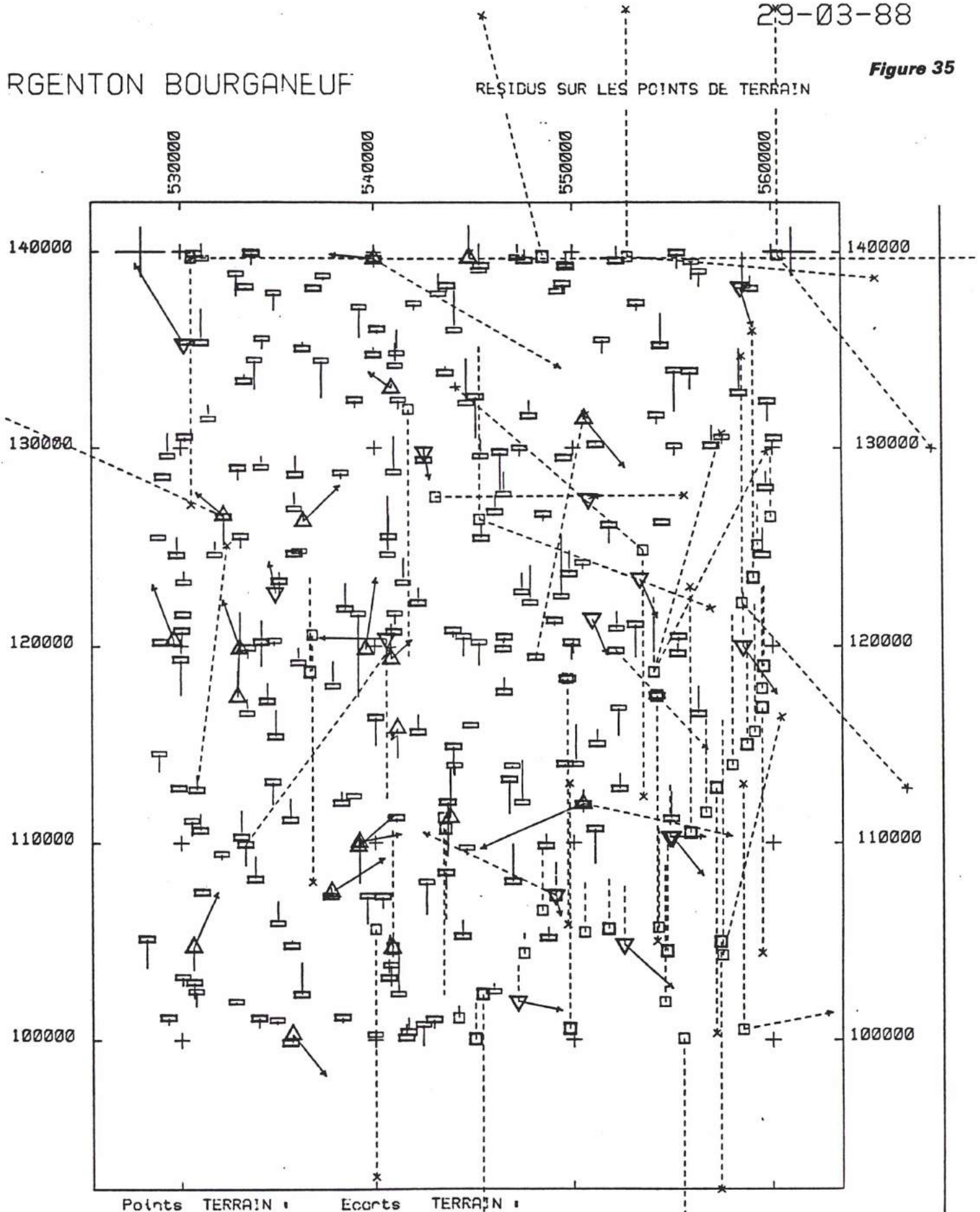
Figure 34

29-03-88

Figure 35

RGENTON BOURGANEUF

RESIDUS SUR LES POINTS DE TERRAIN



Points TERRAIN :

△ en XYZ △

▽ en XY ▽

▭ en Z ▭

□ inutilisé □

Ecarts TERRAIN :

en : 1/100.00

150 cm écart altimétrique

150 cm écart planimétrique

R0502

ELLE 1:250000

C. LA SOUTERRAINE. LASER ET CAPTEUR DE PRESSION COMBINES.

On avait calculé ce bloc en utilisant tous les points connus en points d'appui: c'est-à-dire en se privant de points de contrôle; ce qui finalement ne présentait aucun inconvénient, mais avait l'avantage de bien plaquer le bloc sur le terrain on avait :

24 points connus en planimétrie seulement
33 points connus en planimétrie et en altimétrie
100 points connus en altimétrie seulement

ceux-ci provenant, soit de points de triangulation, ou de rattachements directs aux repères du nivellement de précision, notamment pour les cent derniers.

Pour le calcul des poids on avait adopté les écarts-types a priori suivants :

- CLICHÉS : 5 micromètres
- APPUIS : 0,50 m en planimétrie et en altimétrie

ce qui correspondait aux valeurs couramment adoptées, en FRANCE, pour ce genre de travail.

Les résultats avaient été les suivants :

▪POINTS D'APPUI:

Résidus d'ajustement	r_x =	0,70 m
	r_y =	0,90 m
	r_z =	0,70 m
Résidus sur les mesures clichés : 4,08 µm		

On a ensuite "désactivé" une partie des points utilisés comme des points d'appui, pour les employer comme points de contrôle. Dans ce nouveau calcul on avait :

▪APPUIS:

48 points connus en planimétrie
106 points connus en altimétrie

▪CONTROLE

7 contrôles planimétriques
26 contrôles altimétriques.

Toutes les autres données étant égales à celles du traitement précédent. Les résultats restaient sensiblement les mêmes:

▪APPUIS:

Résidus quadratiques moyens	en X	: 0,76 m
	en Y	: 0,82 m
	en Z	: 0,62 m

▪CONTROLES:

Ecarts quadratiques moyens	en X	: 0,70 m ;	biais : 0,11 m
	en Y	: 0,73 m ;	biais : 0,25 m
	en Z	: 0,46 m ;	biais :-0,25 m
d'où les écarts-types a posteriori:			
Ecarts-types	en X	: 0,69 m	
	en Y	: 0,69 m	
	en Z	: 0,46 m	

C'étaient encore des résultats très satisfaisants pour des points repiqués. Cette satisfaction restait toutefois très modérée car on avait dû éliminer beaucoup de points planimétriques, par suite de fautes d'identification.

D. GUYANE.CAPTEUR DE PRESSION SEUL

Le chantier de SAINT-LAURENT en GUYANE avait été calculé par M.H.SEC qui avait dirigé les opérations de stéreopréparation sur le terrain et par M.Ch.GRATEAU auxquels on est redevable des résultats et des éléments du rapport .

Compte tenu du nombre très faible des appuis, les résultats sont tout à fait remarquables:

Résidus moyens quadratiques r sur les appuis:

X = 1,60m
Y = 1,18m
Z = 0,91m

Ecarts moyens quadratiques ϵ sur les points de contrôle:

X = 0,61m
Y = 1,08m
Z = 0,56m.

Bien entendu, contrairement aux chantiers qui avaient précédé, où les mesures aéroportées n'avaient été introduites que dans une seconde étape du calcul, les mesures statoscope avaient été utilisées d'emblée, le nombre et la disposition des appuis ne permettant pas de s'en passer.

E.CHANTIERS G.P.S.

1.AMIENS - 1.

Sur les points d'appui on avait les résidus d'ajustement suivants :

r_x	=	0,21 m			
r_y	=	0,24 m	r_m	=	0,27 m
r_z	=	0,33 m			

Il n'y avait aucun point de contrôle, les points d'appui étant, eux-mêmes, en nombre insuffisant. Les résidus quadratiques moyens des mesures sur les clichés étaient de 6 µm pour chaque coordonnée.

Les résultats ont été reportés graphiquement sur les figures 37, 38, et 39.

On a ensuite comparé les coordonnées des sommets perspectifs tirées de l'aérotriangulation aux mesures G.P.S. en temps réel fournies par le S.A.A.; puis avec les coordonnées G.P.S calculées en temps différé.

2. AMIENS - 2

On avait mené les mêmes opérations et les mêmes calculs sur le deuxième vol, rappelons que les points d'appui,eux aussi, étaient communs.

Les résidus sur les points d'appui après calcul corrigés des systématismes donnaient :

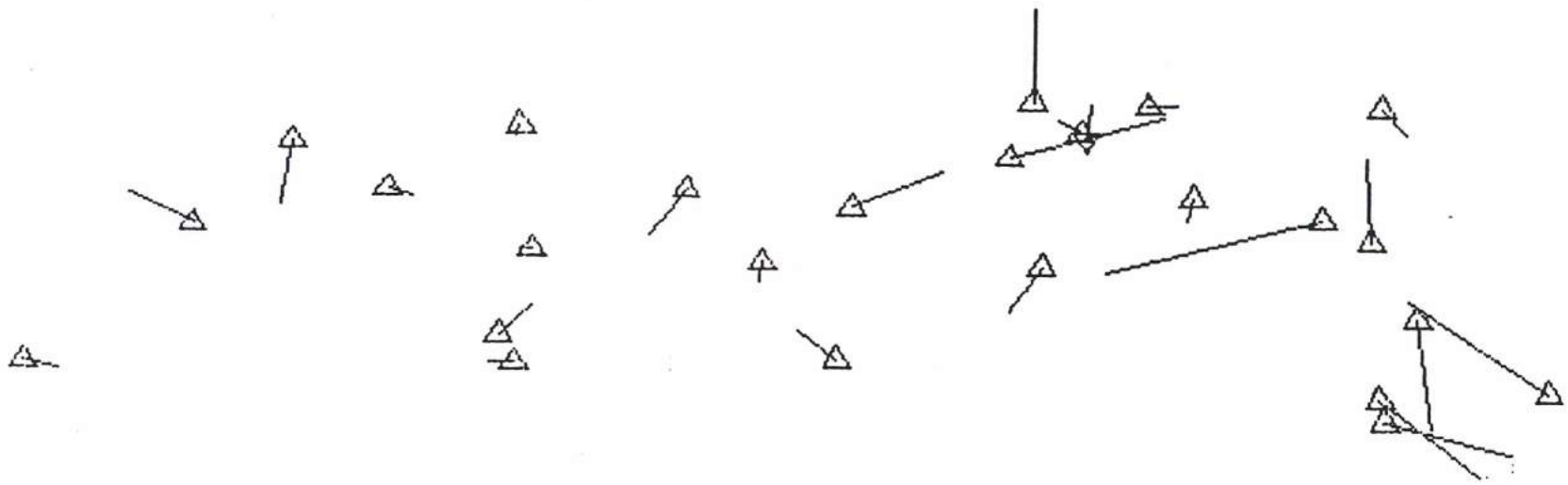
r_x	=	0,29 m			
r_y	=	0,38 m	r_m	=	0,34 m
r_z	=	0,36 m			

Ces résultats, compte tenu de l'échelle de prise de vue, étaient très médiocres ils devraient, normalement, être de l'ordre de 5 à 6 cm et même moins (3cm), si les points d'appui au sol avaient été d'une définition compatible avec l'échelle de prise de vue, c'est-à-dire , s'ils avaient été signalés (balisés).

Voir les résultats graphiques figure 40

Les comparaisons entre les mesures G.P.S. des coordonnées des sommets perspectifs et les mêmes coordonnées calculées par l'aérotriangulation avaient été faites également: d'abord sur les mesures brutes en temps réel, puis sur les signaux retraités par le nouveau logiciel de SERCEL avec, malheureusement, un problème d'enregistrement incorrect des signaux reçus sur une partie de la première et de la seconde bande; seule la troisième bande était complète.

Figure 37



FR0503T ecarts aux points d'appui actifs plani

Figure 38

24-03-87

AMIENS 1

SANS GPS

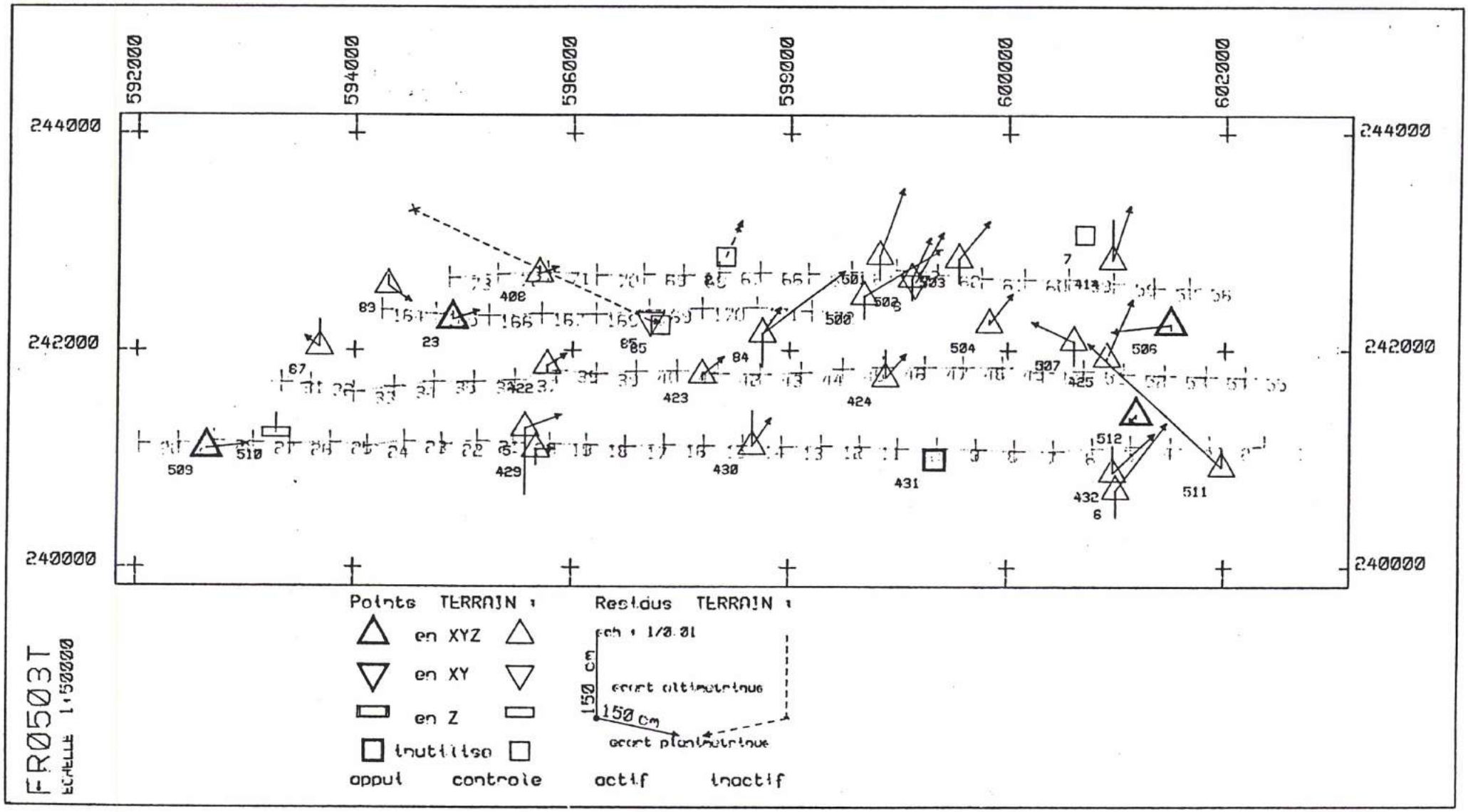
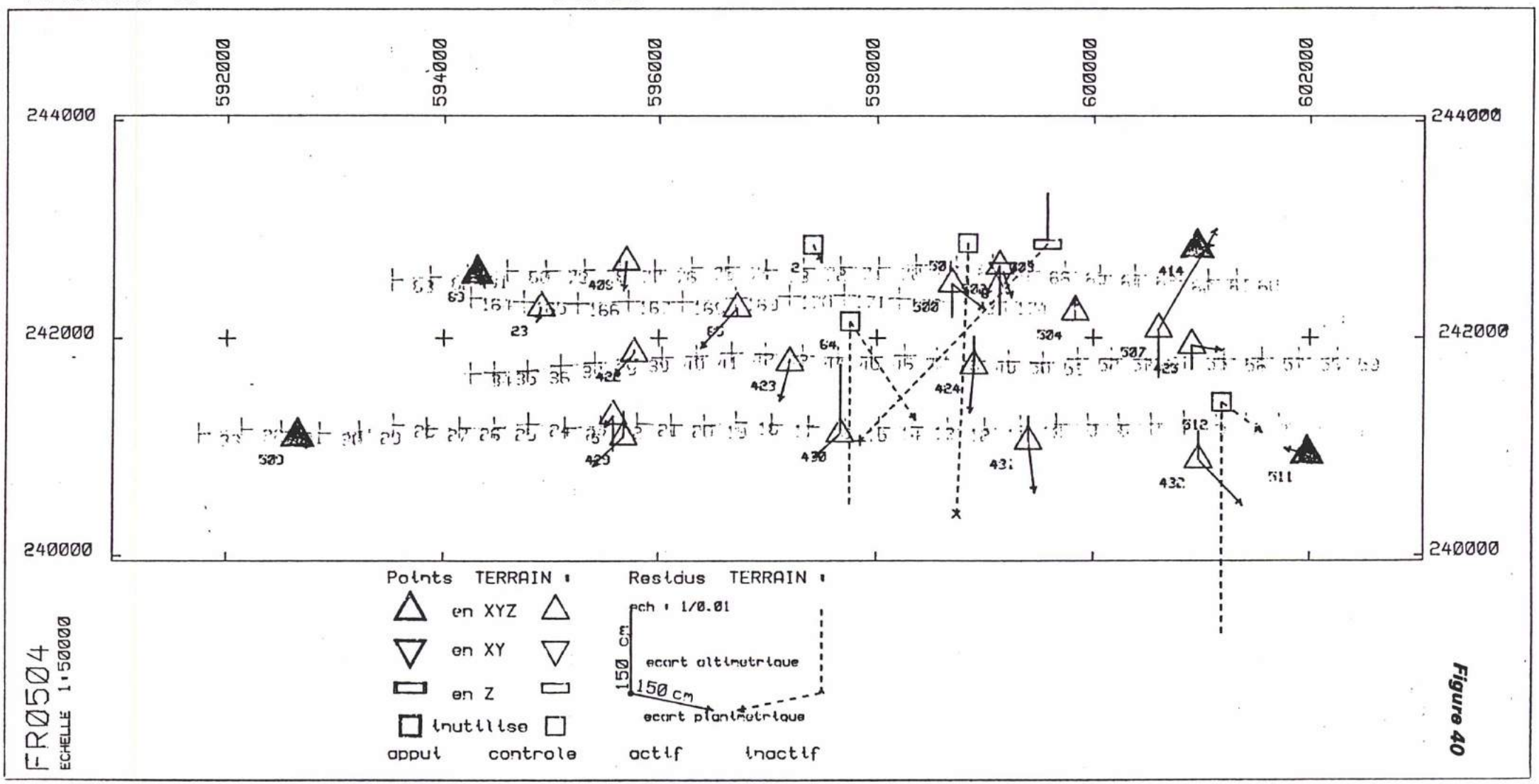


Figure 39

24-03-87

AMIENS 2

SANS GPS



FR0504

ECHELLE 1:50000

Figure 40

F.CHANTIERS G.P.S.ET CAPTEURS DE PRESSION COMBINES.

1. LUNEL

les résidus de l'ajustement du bloc sur les points d'appui du terrain étaient les suivants :

Résidus quadratique moyen en planimétrie	0,75 m
altimétrie	0,60 m

Ce qui paraît normal sur des points repiqués.

Sur les points de contrôle, qui ne participaient pas à l'ajustement, en altimétrie seulement, on avait obtenu un écart-type de 0,43 m, il n'avait pas été utilisé de points de contrôle en planimétrie.

Ces résultats, tels quels, pourraient être considérés comme moyens, toutefois il avait fallu éliminer de nombreux points faux, mal identifiés, pour des raisons déjà évoquées.

2. VICHY

Les résidus d'ajustement étaient bien meilleurs, ce qui était attendu: la stéréopréparation ayant été réalisée dans des conditions normales:

Résidus moyens quadratiques en planimétrie	0,55 m
altimétrie	0,49 m

Sur les points de contrôle, en altimétrie , on avait obtenu un écart-type de 0,43 m.

Peu de points d'appui avaient été éliminés, les résultats étaient satisfaisants, en effet, à cette échelle un écart-type de 5 µm sur l'abscisse cliché d'un point entraînerait un écart-type de 0,38 m en altitude en tenant compte d'un rapport Base/Eloignement = 2.750/4.900, qui paraît être celui du vol; la valeur théorique prévue étant de 2.400/4.500, soit un écart-type théorique de 0,41 m. Par contre, les résidus clichés étaient beaucoup plus élevés que ceux des missions précédentes. Ceci était dû à la présence de bandes transversales, qui "bridaient" les déformations systématiques du bloc.

Afin d'apprécier le rôle joué par ces "contraintes" supplémentaires, on a d'abord retiré les liaisons créees par les deux bandes NORD-SUD qui recouvraient le début et la fin des bandes.

Avec l'équipement complet en points d'appui, et toutes choses restant égales par ailleurs, le résidu moyen quadratique sur les points de contrôle altimétriques passait de 0,43 m à 0,53m.

Les tensions introduites, dans le réseau photogrammétrique, par les bandes transversales, étaient <u>réduites de moitié</u>, le carré des résidus par mesure redondante passait de:

| 4,54*10-5
| à 2,85*10-5 mm2

On avait,ainsi, un exemple où une augmentation des carrés des résidus sur le réseau photogrammétrique avait pour effet une diminution de l'écart-type des résultats sur les points de contrôle.

Les résidus moyens quadratiques calculés dans le réseau ne devraient pas être seulement attribués aux difficultés de report des points d'une bande sur celle qui lui était perpendiculaire, mais aussi aux tensions internes créées par les déformations systématiques des mesures sur les clichés, contrariées ou gênées par le croisement des bandes.

Selon M.HOTTIER ce phénomène pourrait avoir deux causes: Les difficultés de report
Une correction insuffisante des systématismes-clichés

3. ALBERTVILLE.

Le chantier d'ALBERTVILLE avait été calculé, avec d'autres chantiers qui lui étaient liés, en un bloc plus vaste par M.KERMAÏDIC les résultats avaient été les suivants:

Résidus moyens quadratiques r sur les appuis:

X = 0,76m
Y = 0,82m
Z = 0,63m.

Ecarts moyens quadratiques ϵ sur les points de contrôle:

X = 1,02m
Y = 0,85m
Z = 0,80m

Valeurs très correctes en terrain de montagne.Voir les graphiques des résultats figure 41.

4. MANOSQUE.

Le calcul avait été fait, en première phase, comme pour la majorité des chantiers précédents, en exceptant celui de GUYANE, en n'utilisant que les points d'appui et en relevant lezs écarts sur les mesures aéroportées.

Rappelons qu'à MANOSQUE tous les points connus avaient été placés en appui l'utilisation de points de contrôle sur une stéréopréparation aussi ancienne n'ayant pas de sens. Dans ces conditions les résidus moyens quadratiques d'ajustement sur les points d'appui étaient les suivants:

En X= 0,99m
Y= 0,80m
Z= 0,59m

Compte tenu des conditions d'appui ces résultats pouvaient être considérés comme excellents ils reflètaient surtout les difficultés rencontrées pour identifier les points en plani métrie.

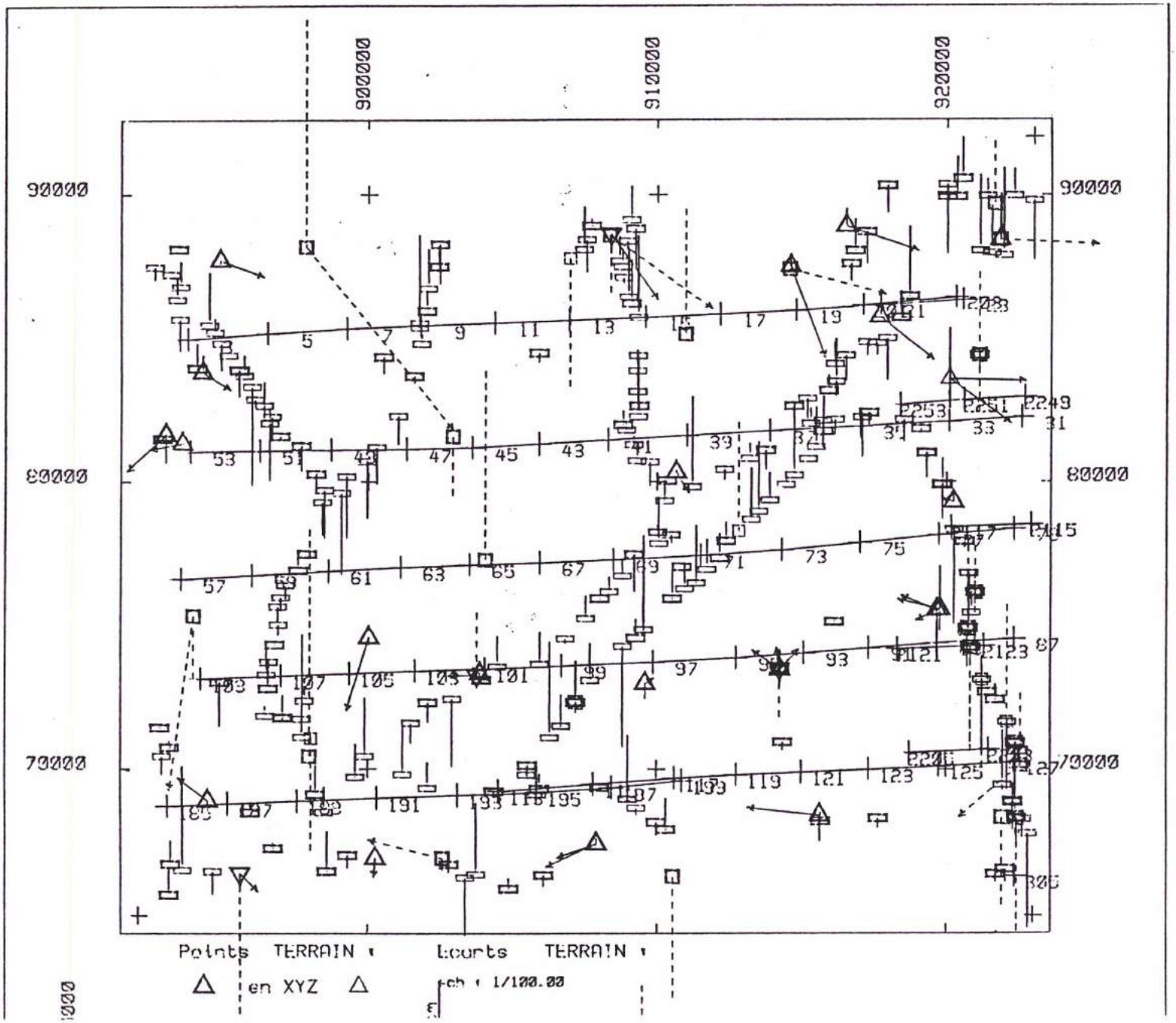

ALBERTVILLE
AEROTRIANGULATION CLASSIQUE
900000
910000
920000
90000
80000
70000
Points TERRAIN
en XYZ
Levels TERRAIN
1/100.00

Figure 41

ANNEXE VI.LES RESULTATS SUR LES MESURES G.P.S.

On donnera, dans ce qui suit, la liste des résultats trop nombreux qui auraient encombré le texte principal, ils ont été obtenus sur les chantiers déjà décrits. Des chantiers, qui n'ont pas été décrits, ont fait l'objet d'observations qui, bien entendu, corroborent les résultats qui seront donnés.

Les mesures laser seules, des deux premiers chantiers n'ont pas pu être introduites dans la compensation, puisqu'il était devenu évident, par les simulations, que cela aurait été inopérant, elles ont été décrites dans le texte principal.

On n'a pu que comparer les hauteurs mesurées à l'aide du télémètre laser, aux hauteurs calculées correspondantes du bloc photogrammétrique placé sur ses appuis.

A.VOLS G.P.S

1. VOL GPS D'AMIENS I.

a. COMPARAISON ENTRE LES COORDONNEES DES SOMMETS ET LES RESULTATS DES CALCULS UTILISANT DES MESURES G.P.S .

On avait d'abord effectué des comparaisons des mesures GPS données par le fabricant, SERCEL, et les coordonnées calculées par voie photogrammétrique classique, sans la participation des mesures GPS.

Les comparaisons avaient donné les résultats suivants :
ϵ represente l'écart moyen quadratique entre la mesure G.P.S et les coordonnées photogrammétriques du sommet et T la translation à apporter aux mesures G.P.S.pour les amener dans le référentiel du terrain.

BANDE 1:			
T_{xb} = 0,51 m		ϵ_x	= 0,34 m
T_{yb} = 1,22 m		ϵ_y	= 0,26 m
T_{zb} = 3,55 m		ϵ_z	= 0,78 m
BANDE 2			
T_{xb} =-0,51 m		ϵ_x	= 0,30 m
T_{yb} = 1,44 m		ϵ_y	= 0,48 m
T_{zb} = 3,61 m		ϵ_z	= 0,23 m
BANDE 3			
T_{xb} = 0,48 m		ϵ_x	= 0,20 m
T_{yb} = 0,95 m		ϵ_y	= 0,21 m
T_{zb} = 2,64 m		ϵ_z	= 0,28 m

on voit que v_x = 0,50 m
$v_y \approx$ 0,17 m ; Toutefois, ce n'étaient que des valeurs calculées. v_x et v_y étaient, bien entendu, le vecteur chambre récepteur qui, malheureusement, n'avait pas été mesuré sur l'avion.

On remarquait, en outre, que la dérive dans le temps de l'altitude variait de 0,06m, entre la première et la seconde bande, elle pouvait donc être négligée, et de 0,97m entre la seconde et la troisième bande, il faudrait, alors ,la prendre en compte.

De même les dérives en ordonnée Y pouvaient, aussi, être négligées.

b.INTRODUCTION DES MESURES G.P.S A LA COMPENSATION.

On avait ensuite introduit les mesures GPS dans la compensation. Les résultats étaient très encourageants, mais il était difficile d'apporter des conclusions en raison de la disparité de la précision des mesures; car à ce stade de l'étude, on n'avait pas encore développé ce qui fait le sujet du chapitre précédent.

Mesures clichés	6 µm	soit	0,024	m
" terrain	25 µm	ou	0,10	m
" GPS	125 µm	ou	0,50	m

La compensation privilégiait les mesures clichés, l'apport du GPS était, par conséquent, marginal.

Les résidus d'ajustement étaient les suivants :

Sur GPS	
résidus d'ajustement	
r_x = 0,36 m	
r_y = 0,42 m	
r_z = 0,61 m	r_m = 0,47 m
APPUIS TERRAIN	
résidus d'ajustement	
r_x = 0,49 m	
r_y = 0,63 m	
r_z = 0,45 m	r_m = 0,53 m

POINTS DE CONTROLE. (appuis terrain désactivés)		
Ecart moyen quad	erreur moyenne	Ecart-type
ϵ_x = 0,36 m	biais x = 0,16	σ_x= 0,32m
ϵ_y = 0,18 m	biais y = 0,13	σ_y= 0,12m
ϵ_z = 0,62 m	biais z = 0,17	σ_z= 0,60m

Les appuis de terrain désactivés ne participent pas à la compensation, on les utilise comme points de vérification.

c.ESSAI AVEC LES MESURES G.P.S ET QUATRE APPUIS AUX ANGLES DU BLOC.

On a réduit le nombre des appuis à quatre points connus en planimétrie et en altimètrie, disposés aux angles du bloc.

On rappellera que pour un bloc normal, c'est-à-dire pour un bloc n'ayant aucune rigidité transversale, cette disposition est très défavorable pour la détermination de l'altimètrie.

Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux appuis eux-mêmes:		
	Premier jeu d'appuis	Deuxième jeu d'appuis
X=	0,15m	0,32m
Y=	0,06m	0,18m
Z=	0,20m	0,07m

On remarquera combien le résultat est sensible au choix des appuis, c'est pourquoi, par la suite, on a cherché le moyen d'éliminer cet effet fortuit qui masque le véritable résultat atteint, qui doit être indépendant des qualités des points retenus.

Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux points G.P.S (83 Sommets perspectifs):		
X=	0,20m	0,48m
Y=	0,23m	0,31m
Z=	0,33m	0,37m

Ecarts quadratiques moyens sur les points de contrôle (13 points photographiques connus en planimétrie et en altimétrie) biais et écarts-types.

	EMQ	BIAIS	ECART-TYPE	EMQ	BIAIS	ECART-TYPE
X=	0,36m	-0,28m	0,22m	0,45m	0,03m	0,45m
Y=	0,54m	0,07m	0,53m	0,68	-0,32m	0,60m
Z=	0,85m	0,49m	0,70m	0,60m	0,03m	0,60m

Ces résultats sont représentés graphiquement sur la figure 42.

Constantes de translation pour l'ensemble du bloc

Sur les mesures G.P.S.
X= -0,46m
Y= 1,72m
Z= -2,73m

24-03-87

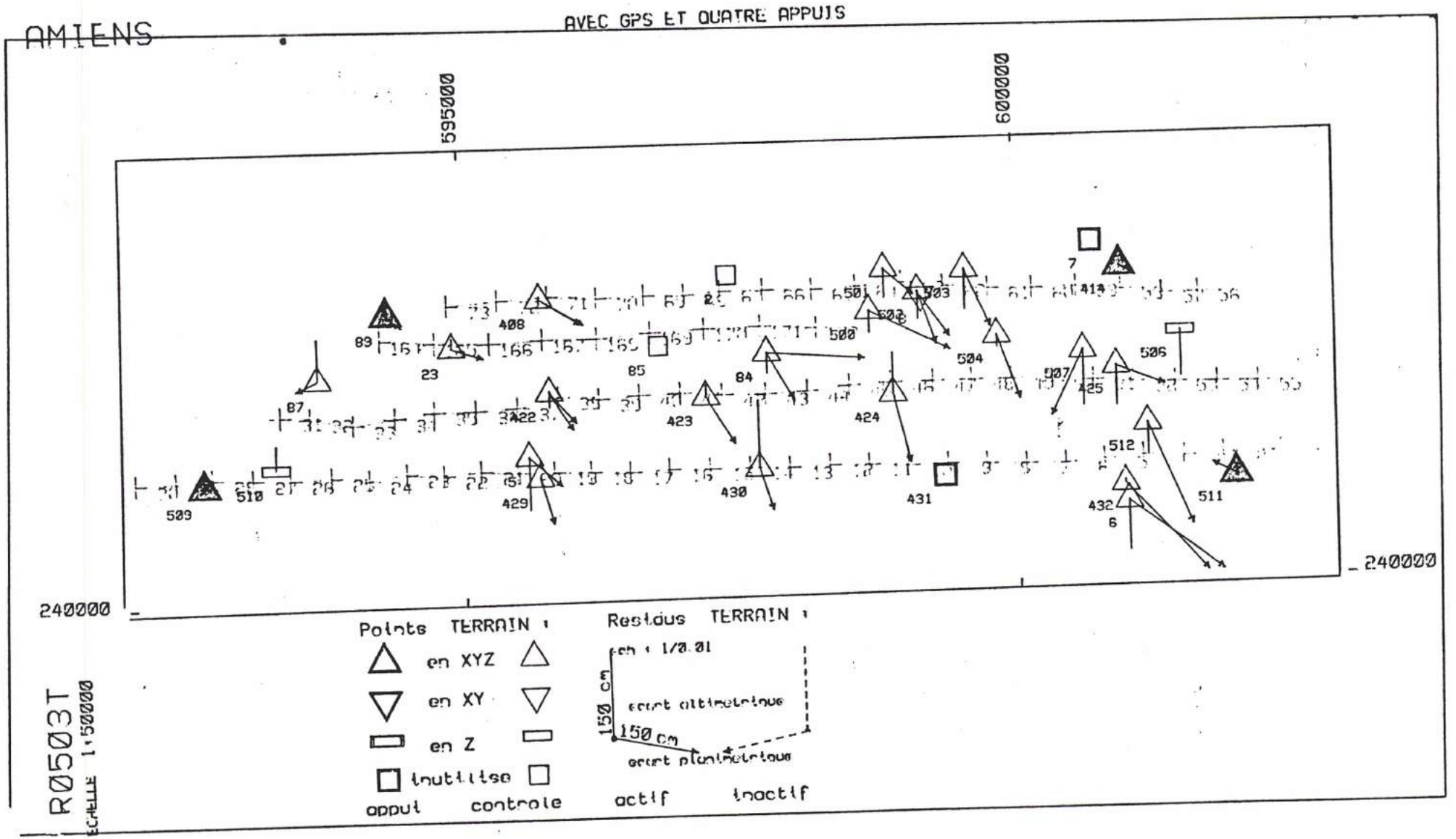


Figure 42

L'écart entre l'ellipsoïde de CLARKE et le geoïde est de l'ordre du décimètre, à AMIENS. Par ailleurs, la trajectographie n'avait bénéficié que de mesures faites au siège de SERCEL à NANTES.

Le résultat était donc d'une qualité exceptionnelle, pour G.P.S., et de qualité très médiocre, pour la partie photogrammétrique.

d.CALCUL DU BLOC SUR UN SEUL POINT D'APPUI SITUE AU CENTRE DU BLOC.

Résidus quadratiques moyens d'ajustement aux points G.P.S (Les mêmes que dans l'essai précédent):

X=	0,24m
Y=	0,27m
Z=	0,30m

Ecarts moyens quadratiques, biais, et écarts-types sur les points de contrôle (Les mêmes que dans l'essai précédent, c'est-à-dire des points topographiques naturels, ou des points photographiques de la mission de 1979).

	EMQ	BIAIS	ECARTS-TYPES
X=	0,51m	-0,02m	0,51m
Y=	0,63m	0,36m	0,52m
Z=	1,57m	-0,27m	1,55m

On remarquera que les résultats étaient assez bons en planimétrie, et plutôt mauvais en altimétrie. Leur analyse avait permis d'en trouver la cause: le défaut de rigidité transversale du bloc normal, et de proposer, pour les essais suivants, un palliatif qui permettrait une meilleure transmission des constantes de translation dans une direction perpendiculaire au plan des clichés du bloc, en l'occurrence l'axe des Z. On avait, aussi, pu vérifier que la rigidité du bloc, dans son plan, était très grande. Les biais n'avaient d'autre signification que de refléter le désaccord entre le point d'appui unique retenu et l'ensemble des points de contrôle.

e.CONTROLE DES LIAISONS ENTRE BANDES.

La qualité de la jonction entre les bandes avait, aussi, été vérifiée, en raison de la mauvaise qualité de leur recouvrement transversal, qui avait obligé d'ajouter une bande du vol de 1979, appelée D dans ce qui suit:

Ecarts-types			
BANDES 1 et 2	BANDES 1 et D	BANDES 2 et 3	BANDES 2 et D
X= 0,06m	0,12m	0,04m	0,11m
Y= 0,09m	0,12m	0,04m	0,11m
Z= 0,10m	0,20m	0,04m	0,13m

Ces valeurs étaient tout à fait normales car les mauvaises transmissions des translations en Z provenaient d'erreurs qui étaient de nature systématique.

2.VOL GPS D'AMIENS II.

Les conditions de prise de vue, et d'appui au sol, étaient, encore, très mauvaises, mais on se doit de rappeler que les mesures GPS d'Amiens se sont faites dans des conditions tout à fait excellentes et même exceptionnelles, ce point a été souligné plusieurs fois par le constructeur du récepteur qui participait aux mesures, la SERCEL.

Pour ce second vol on a déjà signalé que la SERCEL avait eu des problèmes d'enregistrement des signaux en vue de leur traitement en différé, c'est pourquoi on a indiqué, dans le tableau ci-après, le nombre de sommets par bande ayant bénéficié de mesures GPS exploitables, c'est-à-dire correctement enregistrées.

a.COMPARAISON DES COORDONNEES DES SOMMETS PERSPECTIFS PROVENANT DU CALCUL DU BLOC ET DES MESURES G.P.S.

La comparaison des mesures GPS et des coordonnées calculées des sommets perspectifs donnait, en tenant compte des systématismes clichés :

1ère bande (7 sommets)	T_x = 3,02m	T_y = -2,20m	T_z = 0,75m
	ϵ_x = 0,17m	ϵ_y = 0,24m	ϵ_z = 0,87m
2ème bande (12 sommets)	T_x = 2,27m	T_y = -1,26m	T_z = 0,64m
	ϵ_x = 0,13m	ϵ_y = 0,44m	ϵ_z = 0,29m
3ème bande (22 clichés) et sommets)	T_x = 2,44m	T_y = -0,67m	T_z = 1,51m
	ϵ_x = 0,65m	ϵ_y = 0,90m	ϵ_z = 0,46m

La dernière bande présentait des sauts de la valeur de la constante de translation qui devaient correspondre à des pertes de signal, et à l'impossibilité de lever totalement l'ambiguïté du nombre de cycles enregistré. On perdait alors le bénéfice du lissage par la phase.

Un calcul fait sans tenir compte des systématismes des clichés, avait donné des écarts-types beaucoup plus importants sur la position des sommets. Pourtant le vol avait été effectué

dans des conditions telles qu'il n'y aurait dû avoir aucune différence, en effet, l'avion n'était pas pressurisé à l'altitude de prise de vue . L'effet favorable des corrections de systématismes de DUCLOUX ne pouvait provenir que des termes étrangers aux inconnues de réfraction (les deux derniers termes).

En outre, on ne pouvait rien conclure concernant les dérives dans le temps des paramètres de translation, puisque les bandes étaient incomplètes.

b.ESSAI AVEC QUATRE POINTS D'APPUI AUX ANGLES ET LES MESURES G.P.S.

Premier jeu d'appuis	Second jeu d'appui
Résidus moyens d'ajustement quadratiques aux appuis:	
en X= 0,94m	0,49m
Y= 0,17m	0,33m
Z= 0,13m	0,09m
Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux points G.P.S:	
X= 0,70m	1,25m
Y= 0,70m	0,70m
Z= 0,58m	0,73m

Ecarts quadratiques moyens sur les points de contrôle, biais et écarts types:

	EMQ	BIAIS	ECART-TYPE		EMQ	BIAIS	ECARTS-TYPES
X=	0,77m	0,30m	0,71m	X=	0,94m	0,13m	0,93m
Y=	0,80m	0,60m	0,53m	Y=	0,55m	0,00m	0,55m
Z=	0,49m	-0,07m	0,48m	Z=	0,69m	0,03m	0,69m

Les résultats ont été reportés graphiquement sur la figure 43.

c.CALCUL DU BLOC SUR UN SEUL APPUI AU CENTRE ET LES MESURES G.P.S .

Résidus moyens quadratiques r d'ajustement aux coordonnées G.P.S des sommets perspectifs:

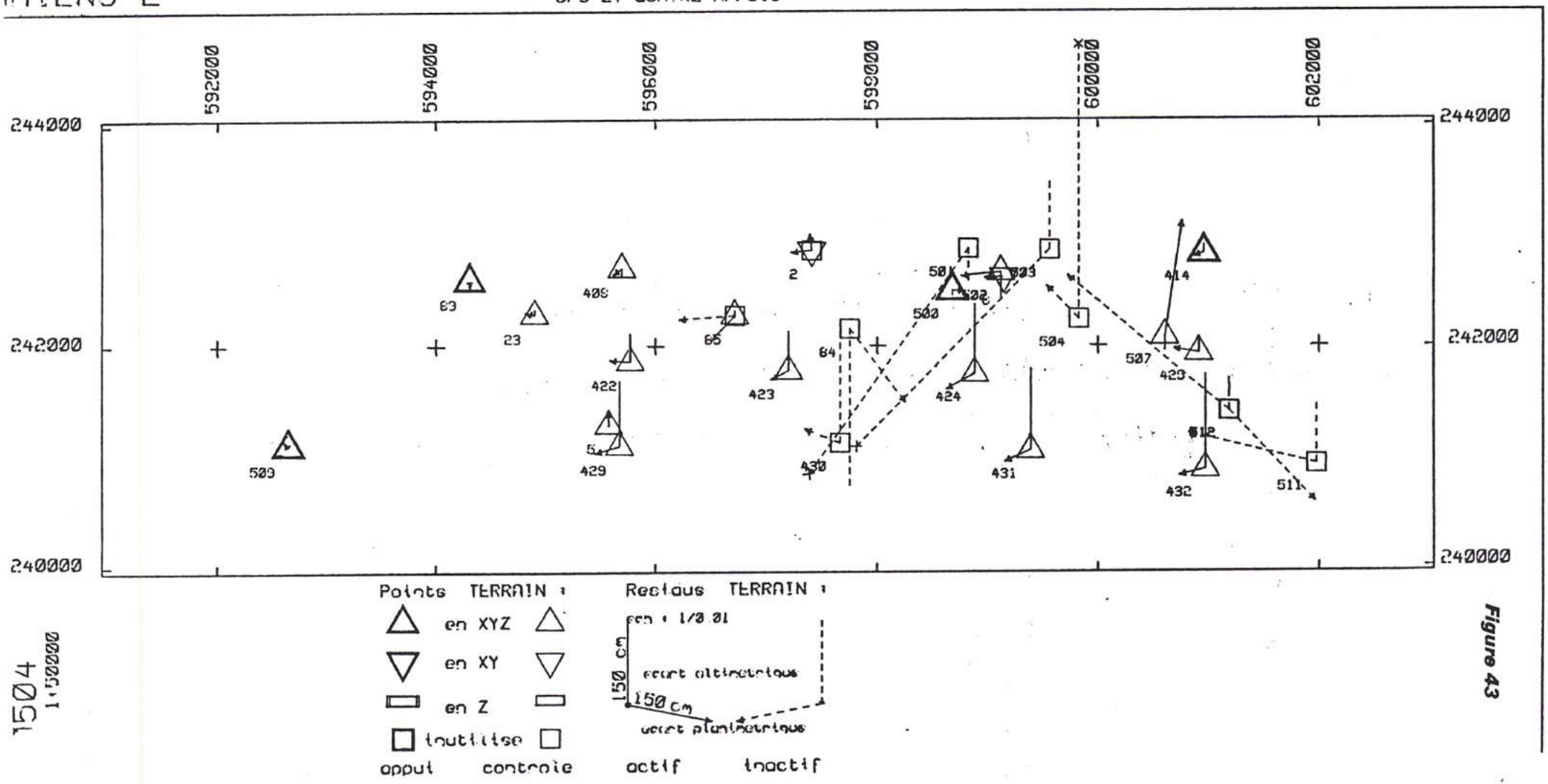
X= 0,44m
Y= 0,44m
Z= 0,47m

Ecarts moyens quadratiques, biais et écarts-types aux points de contrôle(26 points topographiques et photographiques):

24-03-87

IMIENS 2

GPS ET QUATRE APPUIS



1504
1/50000

Figure 43

	Ecart Quad moy	Biais	Ecart-type
X=	0,77m	-0,11m	0,76m
Y=	0,43m	0,02m	0,76m
Z=	0,89m	-0,40m	0,80m

On remarquera qu'il y a peu de différence entre le bloc appuyé sur quatre points aux angles, et le bloc appuyé sur un seul point situé au centre; encore que cette position privilégiée ne soit pas toujours nécessaire . Elle permet de minimiser les effets des systématismes et des erreurs accidentelles. En plaçant le point d'appui, fictif ou réel, au centre, on obtient le résultat le meilleur qu'il sera possible d'obtenir avec un seul appui, les résultats qu'on obtiendrait, en plaçant le point dans une autre position, pourraient être déduits de ceux obtenus à partir du point placé au centre, par des calculs simples , n'obligeant pas à reprendre toute la procédure d'ajustement du bloc.

Les résultats graphiques sont reportés sur la figure 44.

d.LIAISONS ENTRE LES BANDES.

Comme dans l'essai précédent la bande de la mission de 1979 qui a été ajoutée est notée D:

	Ecarts-types de liaison			
	BANDES A et B	BANDES A et D	BANDES B et C	BANDES B et D
X=	0,23m	0,08m	0,04m	0,25m
Y=	0,23m	0,08m	0,04m	0,25m
Z=	0,23m	0,08m	0,04m	0,25m

3.COMPARAISONS EFFECTUEES SUR LES COOR DONNEES DES POINTS PHOTOGRAPHIQUES COMMUNS AUX DEUX VOLS D'AMIENS.

On a déjà fait remarquer que les deux missions d'AMIENS n'avaient pu être exploitées presque normalement, que grâce à l'addition d'une bande de prise de vues d'une mission précédente, cette bande était donc commune aux deux vols, il était donc possible d'utiliser les points photogrammétriques marqués pour comparer leurs coordonnées à la suite de la compensation appuyée, dans les deux cas, sur les points G.P.S seuls, différents pour les deux vols.

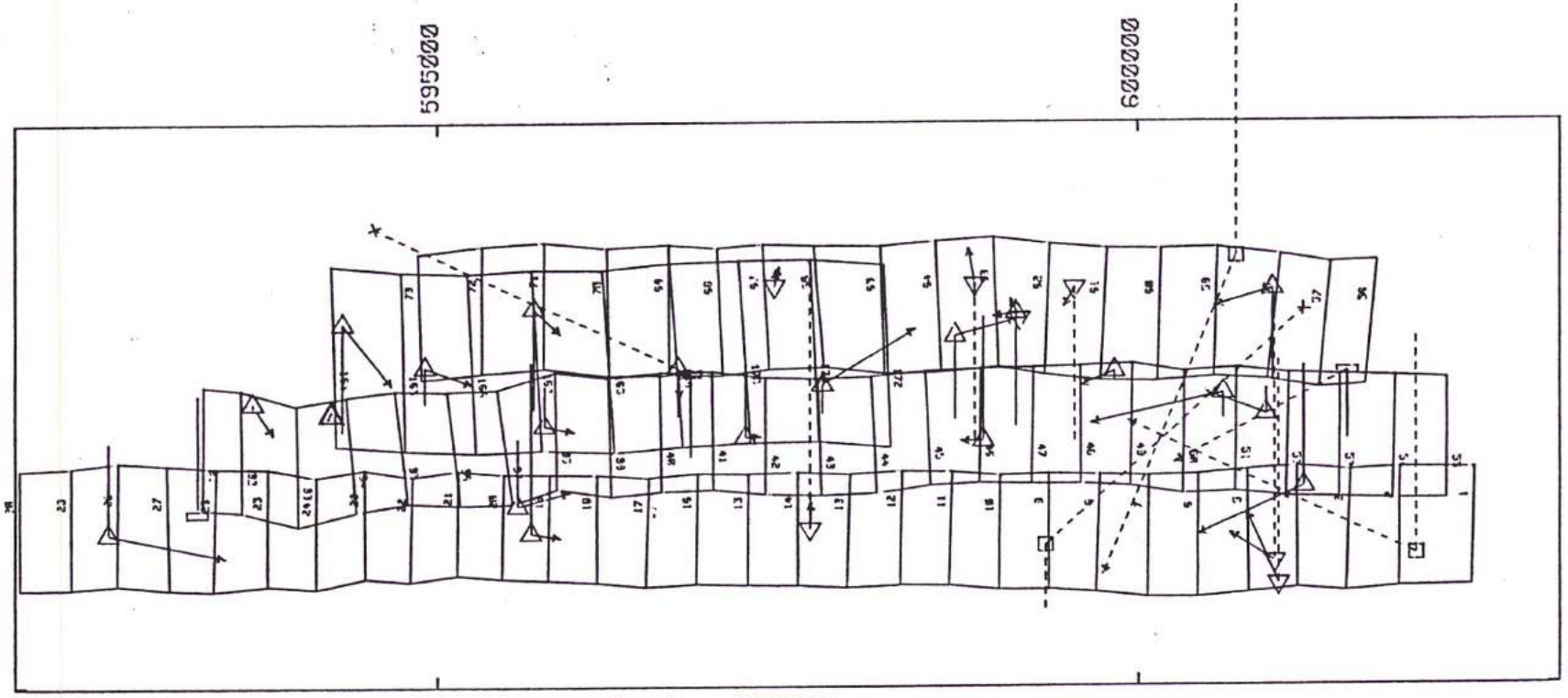
Ces comparaisons sont données figure 45.

Sur l'ensemble du chantier on avait pu faire, aussi, porter la comparaison sur les points de terrain qui étaient tous placés, sauf un, le point d'appui, en contrôle; cette comparaison est faite sur la figure 46.

14-03-88

AMIENS II ESSAI GPS

ESAIS PSEUDO DISTANCES LISSEES PAR PHASE



Points TERRAIN :

△ en XYZ △

▽ en XY ▽

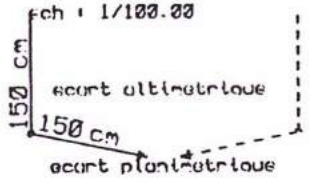
▭ en Z ▭

□ inutilise □

appui controle

Ecarts TERRAIN :

ech : 1/100.00



actif inactif

FR0503T

ECHELLE 1:50000

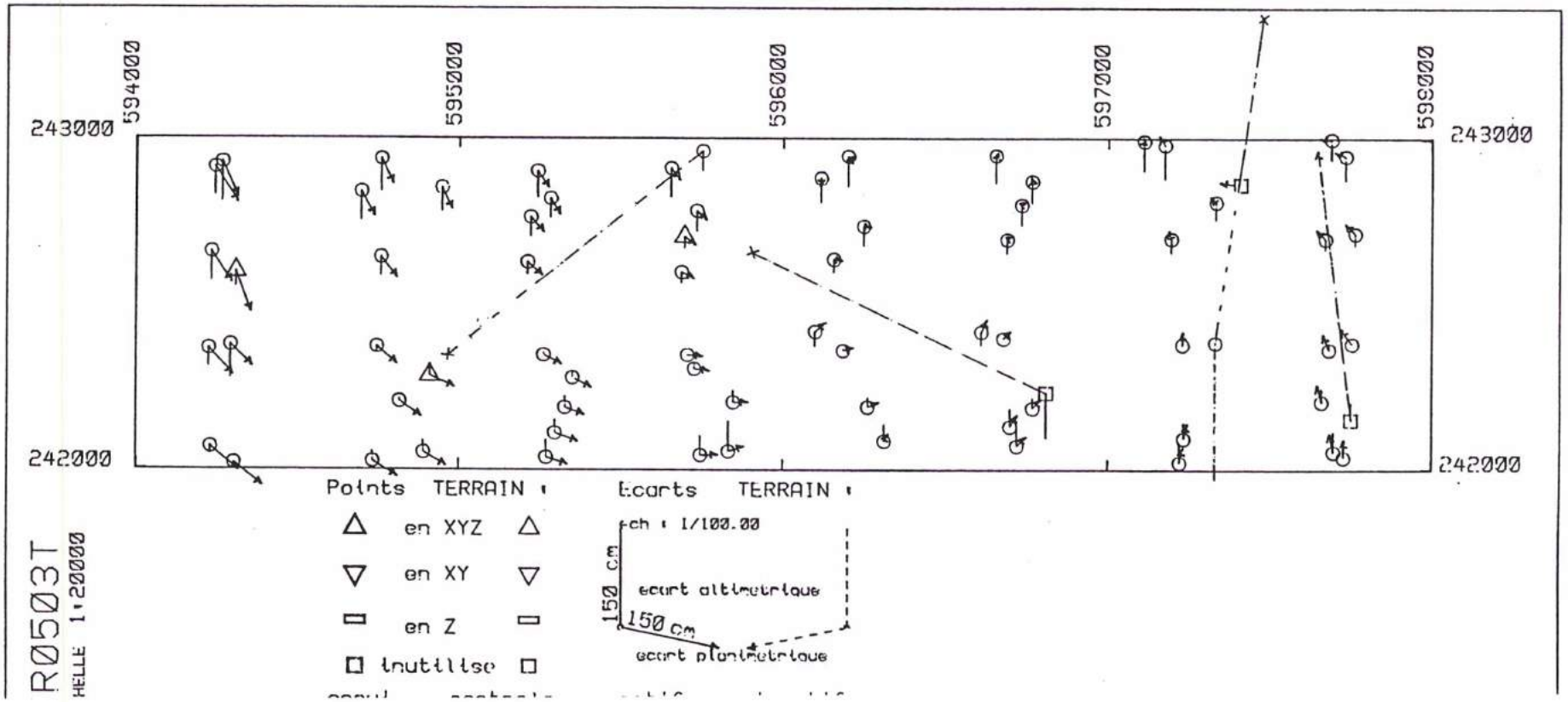
14-03-88

Figure 44

16-03-88

AMIENS I ET II

COMPARAISON ENTRE LES DEUX MISSIONS



R0503T

HELLE 1:20000

Figure 45

16-03-88

1IENS I ET II GPS

COMPARAISON ENTRE LES DEUX MISSIONS

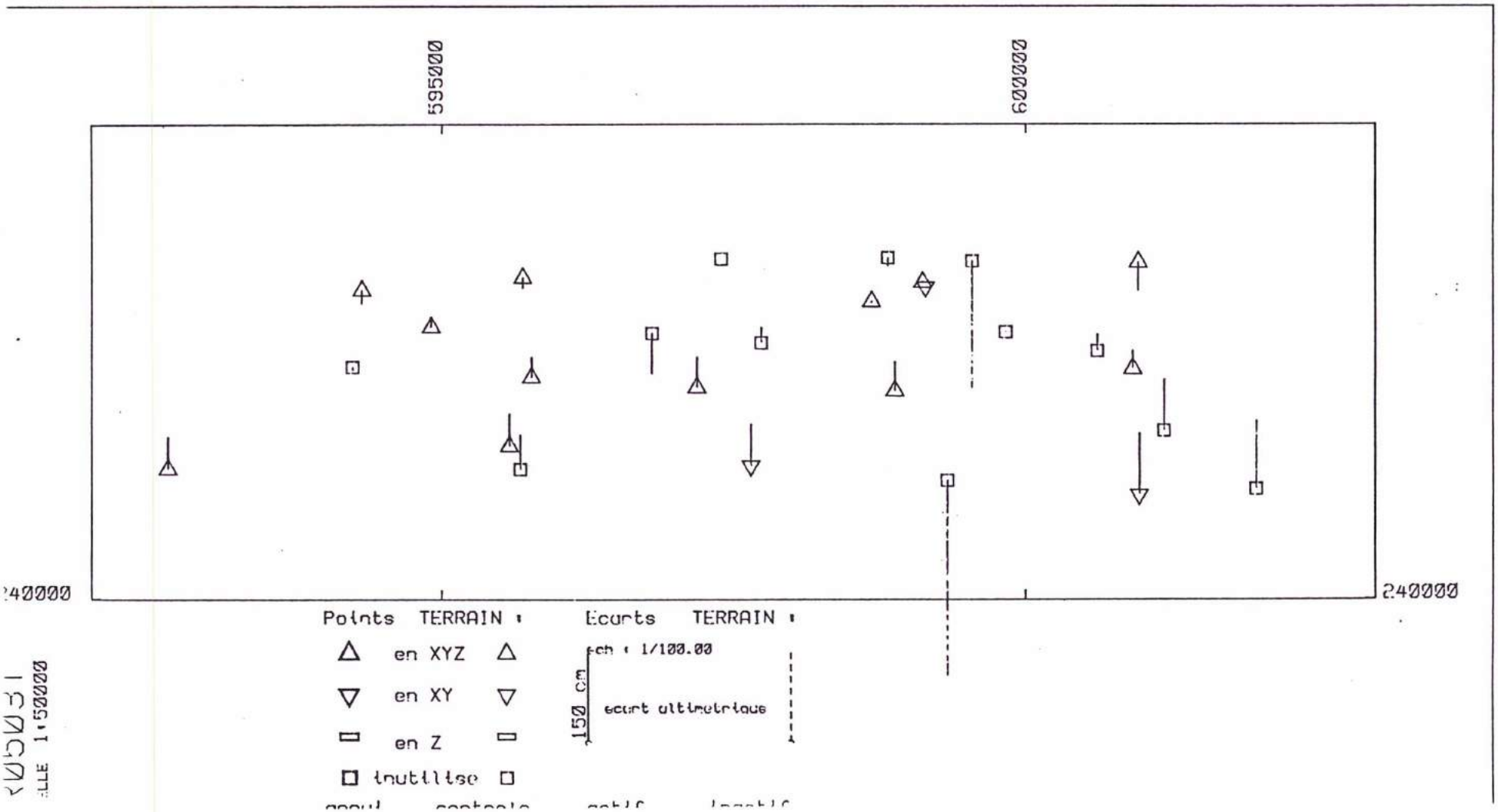


Figure 46

B. MESURES DES POSITIONS DES SOMMETS PAR GPS A LUNEL ET A VICHY.

A la suite des essais très satisfaisants effectués à AMIENS en 1986 dans des conditions excellentes, à bord d'un avion lent, car l'antenne de réception faisait une saillie importante sur son fuselage, il avait été décidé d'entreprendre, en 1987, des vols qui auraient pour quadruple objectif :

1. De vérifier la possibilité d'utiliser le GPS sur un avion rapide en mettant au point une antenne ne faisant pas saillie sur le corps de l'avion, cela ne s'étant jamais fait il s'agissait d'un prototype, de valider sa conception et son installation par l'expérience.

2. De vérifier que la réception était possible sur avion rapide sans introduire un niveau de bruit trop élevé et sans pertes de réception. Ces deux premiers points étaient, bien entendu, du ressort du fabricant SERCEL et du service des activités Aériennes SAA.

3. D'exploiter les mesures à bord de l'avion pour la navigation pour le SAA.

4. Enfin, d'exploiter les mesures faites en les incorporant comme mesures auxiliaires dans le calcul des deux blocs d'aérotriangulation, éventuellement de les associer aux mesures des deux statoscopes et d'apprécier la précision des résultats.

On ne traitera, bien entendu, que de ce dernier point, mais non sans souligner que cette expérience avait sans doute constitué, en son temps, une première mondiale.

L'expérience avait parfaitement réussi, sauf pour les mesures faites sur le site même, qui s'étaient révélées poser des problèmes au moment de leur exploitation.

Les deux chantiers avaient été traités de la même manière, laquelle était tout à fait comparable à ce qu'on a vu pour les statoscopes:

1. Sortie des écarts au point GPS pour éliminer les fautes éventuelles; en fait on en avait trouvé aucune parmi les résultats de calcul de trajectographie, toutes les anomalies décelées provenaient, alors, sans la moindre exception, d'erreurs de saisie, à quelque stade que ce soit; il n'en a plus été de même lorsqu'on avait tenté d'exploiter, soit les résultats des pseudo-distances lissées par la phase, soit, encore moins, les pseudo-distances seules.

Les résultats de trajectographie, traités ici, étaient totalement fiables.

2. Incorporation des équations d'observations des coordonnées des sommets perspectifs par GPS au programme FAISCEAUX, et calcul avec tous les points d'appui.

3. Elimination d'un maximum de points d'appui, ces points devenant des points de contrôle qui ne participaient plus à la compensation, mais permettaient, par leur présence, d'améliorer, s'il en était besoin, la qualité du contrôle.

4. Elimination des bandes transversales afin d'apprécier leur apport et leur rôle.

5. Elimination des inconnues de systématisme afin de laisser le bloc se déformer librement, pour voir si les mesures GPS seraient capables de le redresser.

6. Elimination de tous les points d'appui et création d'un point fictif au centre du bloc pour tenter de simuler ce qu'auraient donné les mesures GPS sur place et pour obtenir des résultats indépendants de la qualité du point d'appui retenu.

1. LUNEL.

1. Les écarts quadratiques moyens aux sommets déterminés par GPS étaient:

Rappelons que les mesures G.P.S ne participaient pas encore à la compensation:

0,39 m en X
0,41 m en Y
0,26 m en Z

Ces résultats étaient parfaitement cohérents avec les enregistrements et les sorties des résidus lors des calculs des positions des sommets perspectifs: La figure 47 porte les conditions de réception qui étaient très bonnes : la G.D.O.P était inférieure à 5; sur la figure 48 ont été reportés les résidus moyens quadratiques sur les mesures à la suite de l'ajustement.

2. Comme pour les mesures statoscope l'apport des mesures GPS dans la compensation avec tous les points d'appui était marginal, voire négligeable :

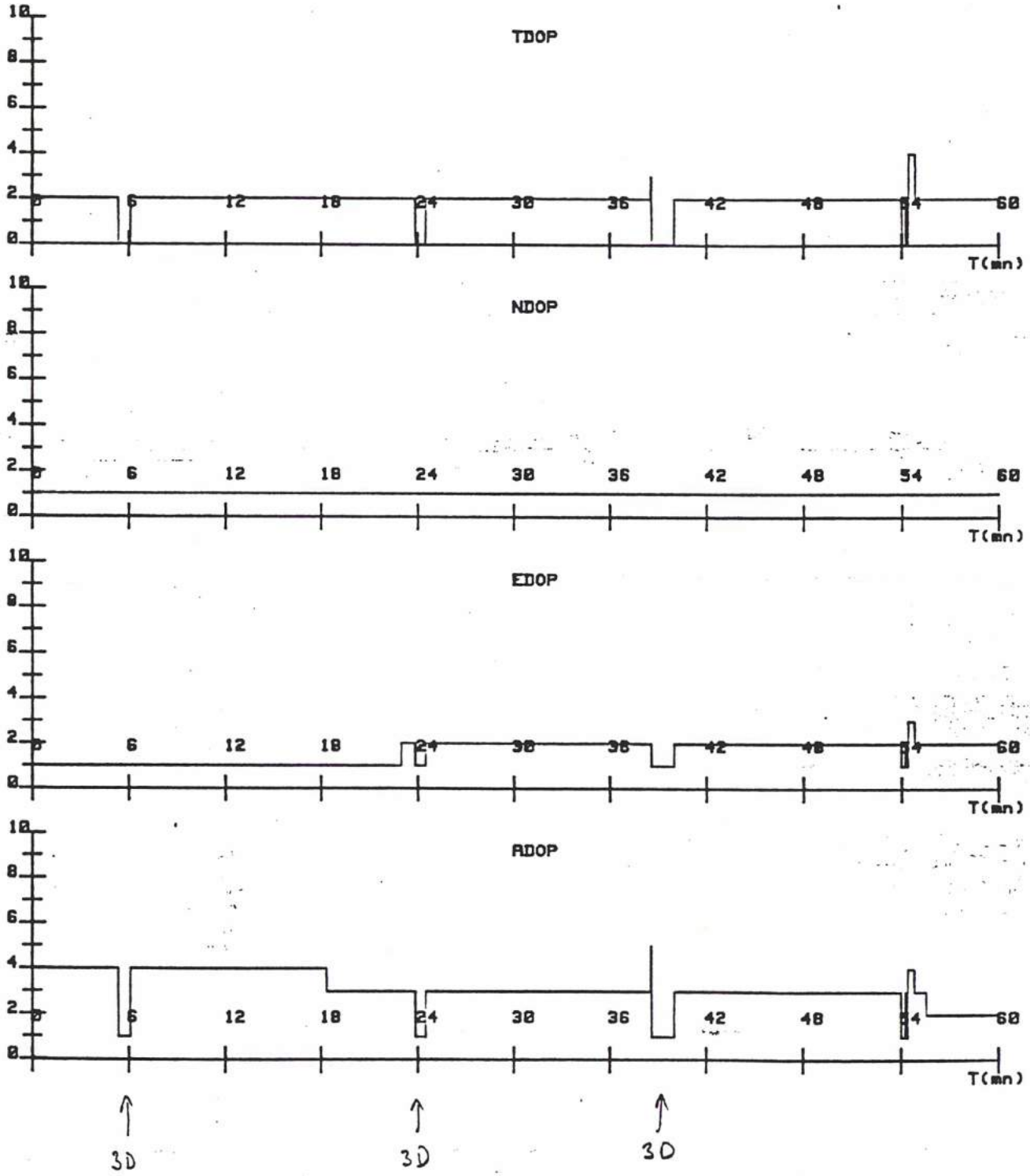
L'écart quadratique moyen, sur les points de contrôle, passait de 0,43 m à 0,39 m en altimétrie.

3. Si on éliminait le maximum de points d'appui, pour ne laisser que quatre groupes de deux points aux angles du bloc, soit huit points d'appui en planimétrie, et onze points d'appui en altimétrie, également rassemblés en quatre groupes de deux ou trois points situés aux angles, et un seul point placé au centre du bloc on obtenait les résultats suivants :

Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux points GPS 0,10m en planimétrie et en altimétrie.

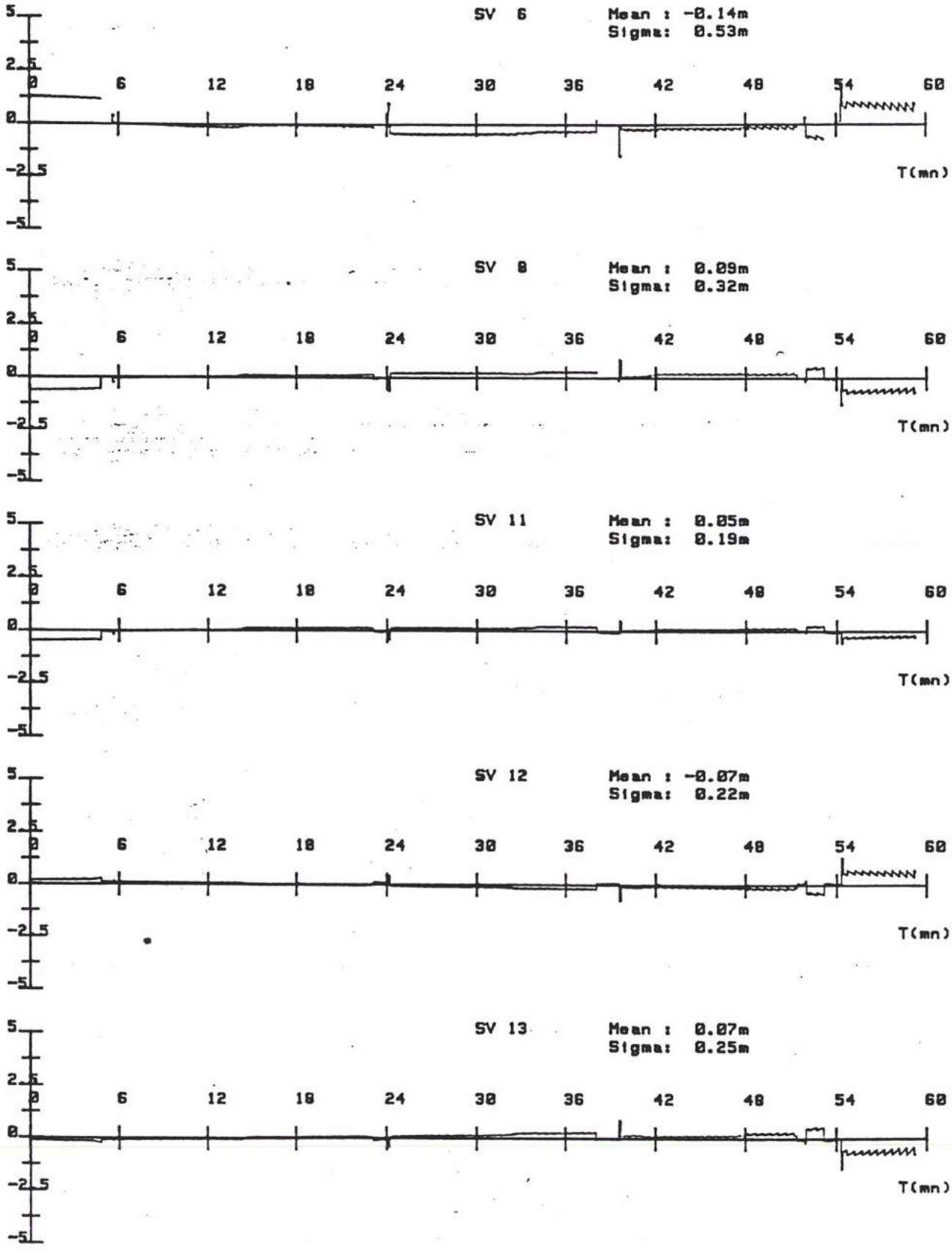
GEOMETRIC DILUTION OF PRECISION
43 33.0158'N 4 29.6995'E4500.00m
Mob : LUNEL/code 4.0 4001
3D+T A N 50 3
Cal: 0.00-0.35 1.58 0.18-2.52
aug 19,1987 7h19m15.2s / 8h19m29.9s
SVs : 6 8 11 12 13

Figure 47



RESIDUALS
44 0.0000'N 4 0.0000'E4500.00m
Mob : MONT/Creil 4.0 4001
3D+T R D 50 3
Cal: 0.00-0.35 1.58 0.18-2.52 7h 0
0.00-0.39 1.33 0.01-2.55 8h30
aug 19,1987 7h19m45.2s / 8h19m 0.2s
SVs : 6 8 11 12 13

Figure 48



Sur les points de contrôle :

Ecarts quadratiques moyens	Ecarts moyens (biais)	Ecarts-types (précision)
X 0,82 m	0,25 m	0,78 m
Y 0,79 m	-0,47 m	0,63 m
Z 0,60 m	0,32 m	0,51 m

On avait eu, visiblement, des problèmes dûs au choix, moins heureux, des points d'appui.

4. Elimination des bandes transversales; ceci ne produisait aucun effet tant qu'on conservait le point d'appui central en altimétrie, par contre, si on l'éliminait, les résultats restaient les mêmes en planimétrie, mais se dégradaient en altimétrie :

Z	0,80 m	0,45 m	0,63 m

5. Elimination des inconnues de systématisme; on obtenait le même résultat qu'avec le statoscope, les mesures G.P.S. et les bandes transversales rétablissaient la situation, si le point central restait présent.

6. Elimination de tous les appuis.

On créait un point fictif au centre du bloc, ce point était supposé sans erreur et sans biais; bien sûr, on avait rétabli les bandes transversales et "réactivé" les inconnues de systématisme, on obtenait alors les résultats suivants :

Ecarts quadratiques moyens sur les points de contrôle :

X = 0,72 m
Y = 0,67 m
Z = 0,61 m.

Ces résultats ont été reportés sur un plan au 1/200.000ème sur la figure 49 pour l'altimétrie seule et sur la figure 50 pour l'ensemble des résultats. On a poché la position du point d'appui fictif.

L'écart moyen était nul puisque le point d'appui fictif était supposé sans biais. Par conséquent, l'écart-type était égal à l'écart quadratique moyen.

Les résultats étaient sensiblement meilleurs, en planimétrie, qu'avec les points repiqués. Ceci était assez étonnant, la précision des mesures G.P.S. était plus grande que celle des points d'appui car, sur ces derniers, la mesure était entachée de l'indécision qui existait sur la définition et l'identification d'un point naturel, ce qui ne se produirait probablement pas avec des points d'appui balisés; en outre, la position centrale du point d'appui fictif était optimale pour l'altimétrie, les plus gros écarts étaient relevés sur les bords

740000

760000

160000

160000

140000

140000

Points TERRAIN :

en XYZ

en XY

en Z

Ecarts TERRAIN :

ech : 1/100.00

150 cm

écart altimétrique

J544

E 1:200000

Figure 49

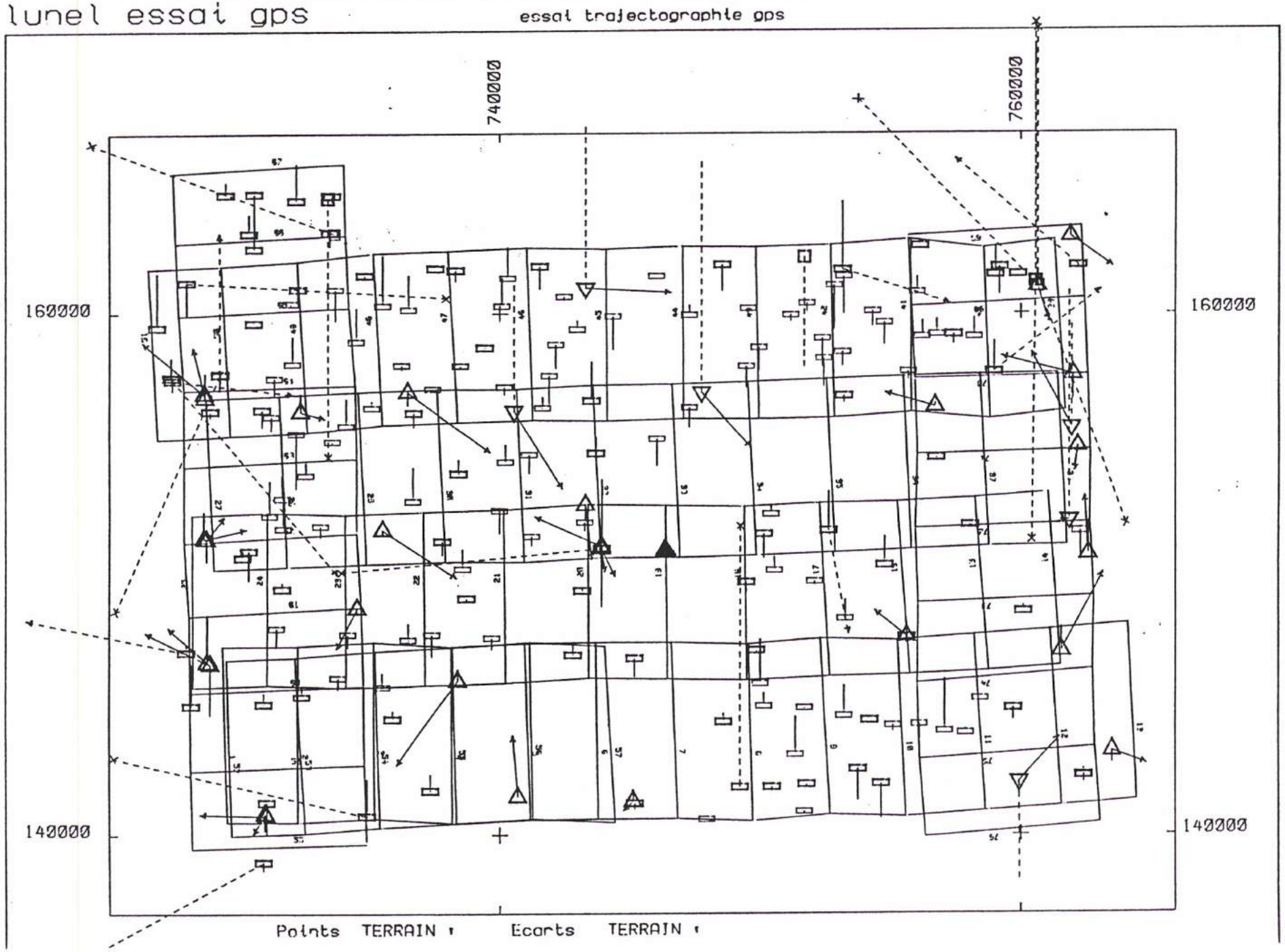

lunel essai gps
essai trajectographie gps
740000
760000
160000
140000
Points TERRAIN :
Ecarts TERRAIN :

Figure 50

les plus éloignés de ce point et sur les angles du bloc, bien entendu en altimétrie seulement; les résultats en planimétrie étaient très peu dépendants de la position du point d'appui, fictif ou réel d'ailleurs.

Si on donnait des coordonnées arbitraires à ce point on pourrait créer un réseau de points de coordonnées relatives connues sans avoir jamais parcouru le terrain, il semble que pour les pays neufs, ne disposant que de faibles moyens financiers à investir dans des travaux de géodésie et de cartographie, cela ouvre des perspectives intéressantes, l'aérotriangulation pouvant permettre de démultiplier les possibilités déjà apportées par G.P.S.

2. VICHY.

1. Rappelons que les points de G.P.S. ne participaient pas à la compensation à ce stade du calcul, leurs positions étaient simplement comparées à celles obtenues à la suite d'un calcul dans lequel n'intervenaient, activement, que les points d'appui du terrain, les valeurs données ci-dessous n'étaient que les écarts quadratiques moyens relevés entre les positions des sommets perspectifs fournis par les mesures G.P.S et celles résultant de l'ajustement du bloc.

Ecarts quadratiques moyens
X = 0,51 m
Y = 0,46 m
Z = 0,35 m.

Les résultats étaient inférieurs à ceux de LUNEL alors que la préparation au sol étant récente, les points d'appui et de contrôle étaient, nécessairement, de meilleure qualité. C'était, très certainement, la qualité des mesures G.P.S. qui était inférieure, pour une ou des raisons qu'on ne saurait préciser pour l'instant; peut être tout simplement parce que toutes les mesures G.P.S manquaient sur une bande entière, par suite, probablement, d'un défaut d'enregistrement et de l'impossibilité de reprendre les calculs de lissage, en retour.

2. Mêmes commentaires que pour LUNEL l'apport était marginal.

3. Elimination du plus grand nombre possible de points d'appui.

On n'avait conservé que quatre points aux angles du bloc en planimétrie et douze points d'appui en altimétrie groupés par deux ou trois points, aux angles et au centre du bloc. Le regroupement des points d'appui visait à s'assurer qu'ils étaient de bonne qualité et à éliminer les fautes éventuelles, sans apporter un supplément d'appui, qui par sa répartition uniforme dans le bloc, aurait masqué l'effet des mesures aéroportées. Les groupes de points agissaient, donc, en tant qu'appuis, comme un seul appui, de meilleure qualité qu'un appui solitaire.

Les résidus quadratiques moyens sur les mesures G.P.S. après ajustement étaient les suivants :

X = 0,35 m
Y = 0,25 m
Z = 0,24 m.

Les écarts moyen quadratiques, les écarts moyens, et les écarts-types, relevés sur les points de contrôle avaient été les suivants :

Ecarts quadratiques moyen	Ecarts moyens	Ecart type
X 0,56 m	- 0,12 m	0,55 m
Y 0,59 m	0,30 m	0,51 m
Z 0,66 m	0,00m	0,66 m

4. On éliminait, ensuite, les bandes transversales NORD-SUD.
Les résidus quadratiques moyens sur les points G.P.S. étaient les suivants :

X = 0,34 m
Y = 0,27 m
Z = 0,17 m

Ces résultats étaient tout à fait comparables à ceux obtenus avec les bandes transversales.

Les écarts aux points de contrôle sont présentés dans le tableau ci-après:

	SANS GPS		
Ecarts	quadratiques moyens	Ecarts moyens	Ecarts types
X	0,74 m	0,26 m	0,69 m
Y	0,87 m	0,11 m	0,86 m
Z	2,05 m	-0,47 m	1,99 m
	AVEC GPS		
X	0,63 m	0,01 m	0,63 m
Y	0,78 m	0,27 m	0,73 m
Z	1,47 m	1,09 m	0,98 m

5. On éliminait les inconnues de systématisme de DUCLOUX :

		SANS GPS	
X	0,80 m	0,22 m	0,77 m
Y	0,66 m	0,12 m	0,64 m
Z	7,09 m	5,69 m	0,98 m
		AVEC GPS	
X	0,72 m	0,17 m	0,70 m
Y	0,87 m	0,34 m	0,80 m
Z	1,97 m	1,48 m	1,30 m

6. Tous les points d'appui étaient éliminés, on plaçait un point d'appui factice au centre du bloc, les inconnues de systématisme étaient "activées", les bandes transversales étaient rétablies.

Résidus quadratiques moyens d'ajustement sur les coordonnées GPS :

X = 0,25 m
Y = 0,17 m
Z = 0,21 m

Ce qui correspondait, très probablement, à une valeur proche de la précision interne de la mesure G.P.S; on pourra consulter l'étude de précision faite dans le texte peincipal dans lequel on verra que la précision que l'on peut attendre de la méthode de calcul employée devrait donner un écart-type sur chaque coordonnée de l'ordre de 0,27m.

Ecarts quadratiques moyens sur les points de contrôle:

On pourra trouver un plan au 1/200.000ème portant les écarts moyens quadratiques relevés sur les points de contrôle, c'est-à-dire sur tous les points disponibles du bloc Figure 51

X = 0,65 m
Y = 0,64 m
Z = 0,88 m.

On remarquera, sur la figure, la présence de systématismes, qui auraient, peut être, pu être éliminés en introduisant des "inconnues de rotation" dans le modèle. Bien entendu il n'aurait plus été possible de s'appuyer sur un seul point, par ailleurs les inconnues de rotation, en dehors de celle qui serait perpendiculaire à l'axe de vol qui est rectiligne, resteraient indéterminées, si on tentait de les calculer par bande!

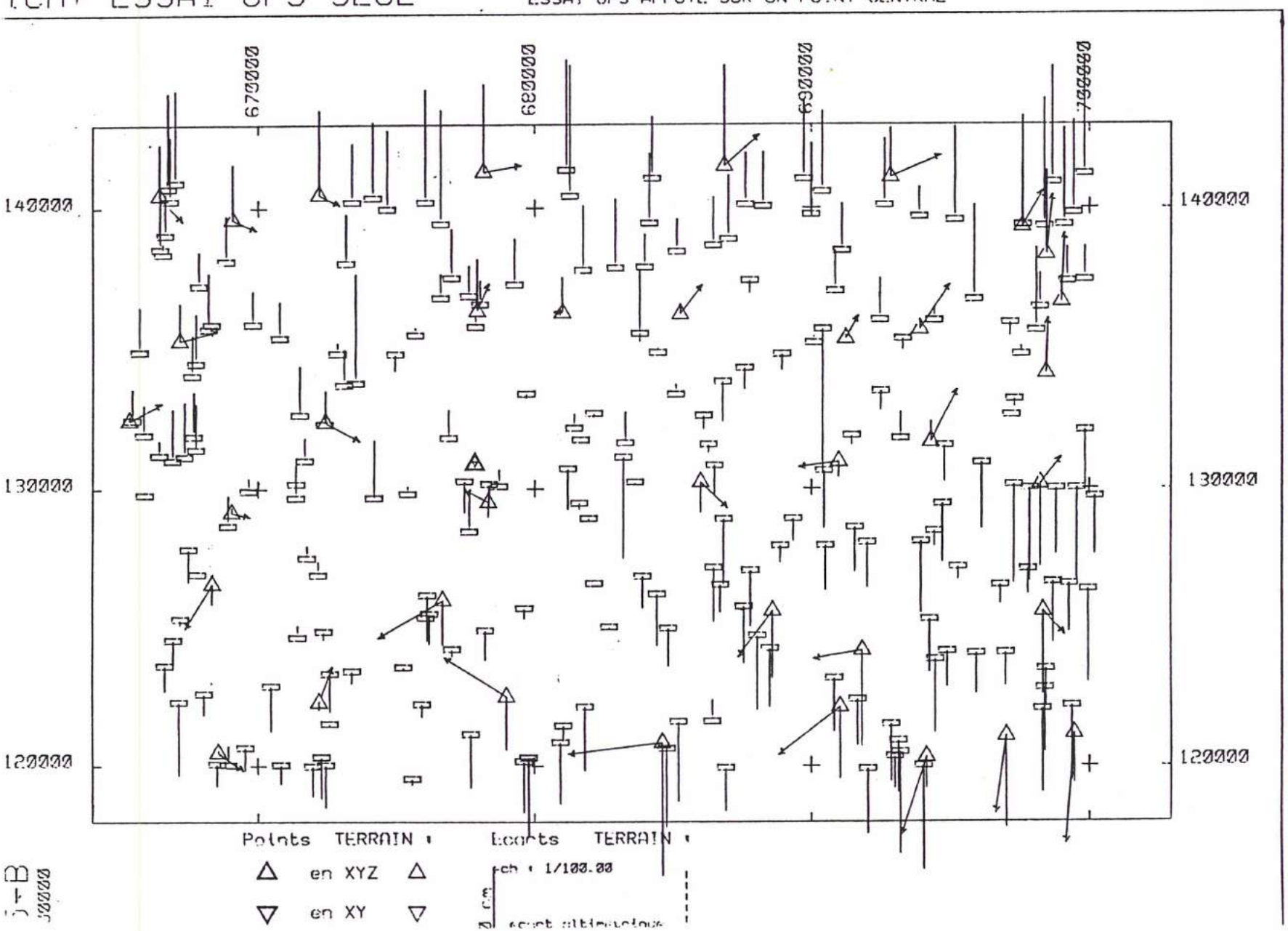

ICHY ESSAI GPS SEUL
ESSAI GPS APPUYE SUR UN POINT CENTRAL
670000
680000
690000
700000
140000
130000
120000
Points TERRAIN :
en XYZ
en XY
Ecarts TERRAIN :
ech : 1/100.00

Figure 51

7. On avait essayé, par pure curiosité, de désactiver les inconnues de systématisme DUCLOUX, avec la même configuration que ci-dessus, c'est-à-dire en conservant les bandes transversales et le même appui fictif au centre du bloc, les écarts quadratiques moyens aux points de contrôle étaient :

X = 0,59 m
Y = 0,75 m
Z = 0,98 m.

Ce qui soulignait le rôle des bandes transversales pour redresser le bloc, sans elles l'écart serait de plusieurs mètres en altimétrie.

C. COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS OBTENUS SELON DIFFERENTES TECHNIQUES DE MESURES OU DE CALCUL DE G.P.S.et LEUR INFLUENCE SUR LES QUALITES DES POINTS DE CONTROLE.

1. DESCRIPTION GENERALE.

Les résultats rapportés ci-dessus étaient obtenus, pour les vols d'AMIENS I et II, par un calcul des coordonnées des sommets perspectifs dit "de pseudo-distances lissées par la phase voir la référence [41 BROSSIER & al] sur ce sujet, toutefois des corrections de trajectographies avaient été apportées par la SERCEL à partir de mesures faites à NANTES, c'est-à-dire très loin du chantier; par contre sur LUNEL et sur VICHY, ce calcul avait été complété par la prise en compte des enregistrements faits simultanément à NANTES et à CREIL, ce qui avait permis de corriger, plus correctement, les résultats des variations des biais dûs aux éphémérides diffusées par les satellites, aux variations inconnues de leurs paramètres de position entre deux mises à jour, et aux erreurs de réfraction qui restaient inconnues de celui qui ne pouvait pas déchiffrer le code P. Ce type de calcul, plus complet et nécessairement plus précis, était appelé "trajectographie".

Il semblait que les conditions de stabilité de ces deux sources de systématismes étaient meilleures pendant les vols d'AMIENS que pendant ceux de VICHY et de LUNEL, où elles avaient varié de façon considérable, surtout en altimètrie.

La comparaison entre les résultats obtenus par les pseudo-distances lissées par la phase et par trajectographie présentait un assez grand intérêt économique, car dans le premier cas il était possible de ne disposer que d'un appareil dans l'avion, dans le second il fallait disposer d'un second appareil, de préférence près du lieu de la prise de vue, et d'une équipe envoyée sur place, pour l'implanter et le faire fonctionner.

Certains auteurs avaient fixé la distance maximum entre le chantier et le point connu au sol, où seraient faites les observations à 100Km, M.P.WILLIS [62] propose un maximum de quelques dizaines de kilomètres, pour les mesures traitées à l'aide des logiciels "cinématiques". En fait c'est le rapport base/ distance du satellite(environ 20.000km) qui intervient

pour fixer la précision obtenue par trajectographie, la base étant, dans ce cas, la distance entre le récepteur fixe au sol et l'avion recevant la même constellation, il est certain qu'aux échelles des essais qu'on a éffectués l'intérêt était moindre qu'à de plus grandes échelles. Il ne faut pas en conclure que ce serait toujours le cas; aux grandes échelles il serait absolument indispensable, non seulement de disposer d'un récepteur au sol, mais aussi qu'il ne soit pas trop éloigné de l'avion. On constate, en effet, des sauts en cours de réception qui peuvent être dûs soit au rafraîchissement des éphémérides, soit à des variations brusques de la réfraction; les premières sont prises en compte quelle que soit la distance, les secondes ne le sont pas. Lorsqu'on a calculé les blocs par les pseudo-distances lissées par la phase ces sauts sont soit passés inaperçus lorsqu'ils se produisaient lorsque l'avion se retourne pour atteindre le début de la bande suivante, soit les sommets les moins nombreux de la bande avant ou après le saut ont dûs être éliminés.

Il était également intéressant de vérifier, pour les mêmes raisons, si des appareils plus simples, et par conséquent beaucoup moins coûteux, ne pourraient pas suffire pour ce travail.

Ces types d'appareils n'étaient pas en mesure de déterminer la position des sommets en utilisant l'intégration Doppler, ils se contentaient de fournir, généralement, les positions des sommets à l'aide des pseudo-distances seules, or on sait que la mesure des pseudo-distances est "bruitée" de plusieurs mètres, en dehors des erreurs systématiques, les erreurs accidentelles sur les mesures des pseudo-distances appelées URE (User Range Error) étaient estimées à 2 ou 3,00m, cette valeur tirée de la littérature technique récente était confirmée par les enregistrements de SERCEL: la figure 52 montre des Graphiques du bruit sur les mesures des pseudo-distances; sur la figure 53, on remarquera, notamment, des dérives dans le temps qui n'apparaissaient pas sur la figure 48, indiquant que les résidus d'ajustement sur les pseudo-distances lissées par la phase variaient dans le temps, ces variations étaient corrigées par la trajectographie, avec un seul appareil il n'était plus possible de les connaître. Les résidus des calculs des positions des sommets perspectifs calculées à l'aide des pseudo-distances seules étaient encore plus importants, on trouvera ces résidus sur la figure 54.

Par ailleurs, leur cadence "d'acquisition" était, généralement aussi, de plusieurs secondes pendant lesquelles l'avion parcourerait presque un kilomètre; il aurait été, par conséquent, nécessaire d'interpoler la position du sommet perspectif sur cette distance.

On doit rappeler que la cadence de détermination des positions des sommets perspectifs du TR5-S B construit par la SERCEL est de 0,60 seconde, pendant ce laps de temps un avion rapide, tel que le MY 20, ne parcourait que 100m ce qui permettait, dans les essais qu'on vient de décrire, de se contenter d'une interpolation linéaire entre les positions réellement mesurées avec, déjà, une erreur inévitable de 0,16m dûe à la précision de la mesure du temps de la prise de vue (1/1.000ème de seconde).

Si l'interpolation devait se faire sur une distance

plus grande, et si le temps de la prise de vue ne pouvait pas être fixé avec la même marge d'erreur, sa précision serait moins bonne; cette particularité souligne le gros avantage que représente l'appareil de la SERCEL par rapport à ses concurrents, pour l'utilisation particulière qu'on en faisait, il semble que le choix de cet appareil ait été fort judicieux .

Bien qu'il n'ait pas été possible de simuler une cadence différente d'acquisition, on a mené les calculs en introduisant comme observations G.P.S., dans le bloc, la position des sommets perspectifs déterminés par les pseudo-distances seules pour le chantier de LUNEL.

2. LES RESULTATS

a. LUNEL.

Trajectographie	Pseudo-distances lissées par la phase	Pseudo-distances seules
Quatre appuis		
1°Résidus moyens quadratiques aux points G.P.S:		
X= 0,10m	0,35m	3,72m
Y= 0,10m	0,32m	2,58m
Z= 0,10m	0,71m	3,28m
2°Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux appuis:		
X= 0,39m	0,56m	0,47m
Y= 0,41m	0,56m	0,52m
Z= 0,26m	0,53m	0,22m

3°Ecarts moyens quadratiques sur les points de contrôle:

	EMQ	BIAIS	ECT-TY	EMQ	BIAIS	ECT TYPE	EMQ	BIAIS	ECT
X=	0,82	0,25	0,78	0,77	0,07	0,77	1,36	-0,44	1,29
Y=	0,79	-0,47	0,63	0,65	0,09	0,64	3,21	-2,21	2,32
Z=	0,60	0,32	0,51	0,62	0,32	0,53	1,02	0,28	0,98

Un seul appui fictif les biais étant éliminés

Trajectographie	pseudo-distances lissées par la phase	Pseudo-distances seules
1° Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux points G.P.S		
X= 0,13m	0,30m	4,14m
Y= 0,14m	0,28m	2,47m
Z= 0,15m	0,69m	4,05m

Trajectographie	pseudo-distances lissées par la phase	Pseudo-distances seules
2° Ecarts moyens quadratiques sur les points de contrôle:		
X= 0,72m	0,75m	1,04m
Y= 0,67m	0,70m	1,27m
Z= 0,56m	0,63m	0,93m

Les valeurs des écarts et des résidus pour les positions des sommets obtenues par les pseudo-distances seules ne tenaient pas compte des erreurs qui auraient été commises sur les interpolations entre les points mesurés pour les déterminer, par conséquent, les résultats réels seraient encore plus médiocres.

On trouvera, figure 55, les résultats concernant les résidus de l'ajustement fait à l'aide des positions déterminées par les pseudo-distances lissées par la phase pour l'altimétrie seule, et figure 56 pour les trois coordonnées: les résultats sont peu différents de ceux obtenus par trajectographie; ils mériteraient d'être confirmés par d'autres essais. Par contre les résidus d'ajustment résultants d'une compensation dans laquelle les positions des sommets perspectifs avaient été calculés à l'aide des pseudo-distances seules étaient moins bons, comme celà était prévu, mais meilleurs qu'on aurait pu l'espérer.

La figure 57 est un plan au 1/200.000ème sur lequel on a reporté les résidus d'ajustement en altimétrie à la même échelle que pour les précédents essais; la figure 58 présente les résidus d'ajustement dans les trois coordonnées mais à échelle moitié, pour ne pas brouiller le dessin. On remarquera que les résidus sur les points de contrôle sont encore satisfaisants malgré l'imprécision inévitable sur les appuis. Rappelons encore une fois que ce phénomène à été signalé pour la première fois par le professeur ACKERMANN.

b. VICHY .

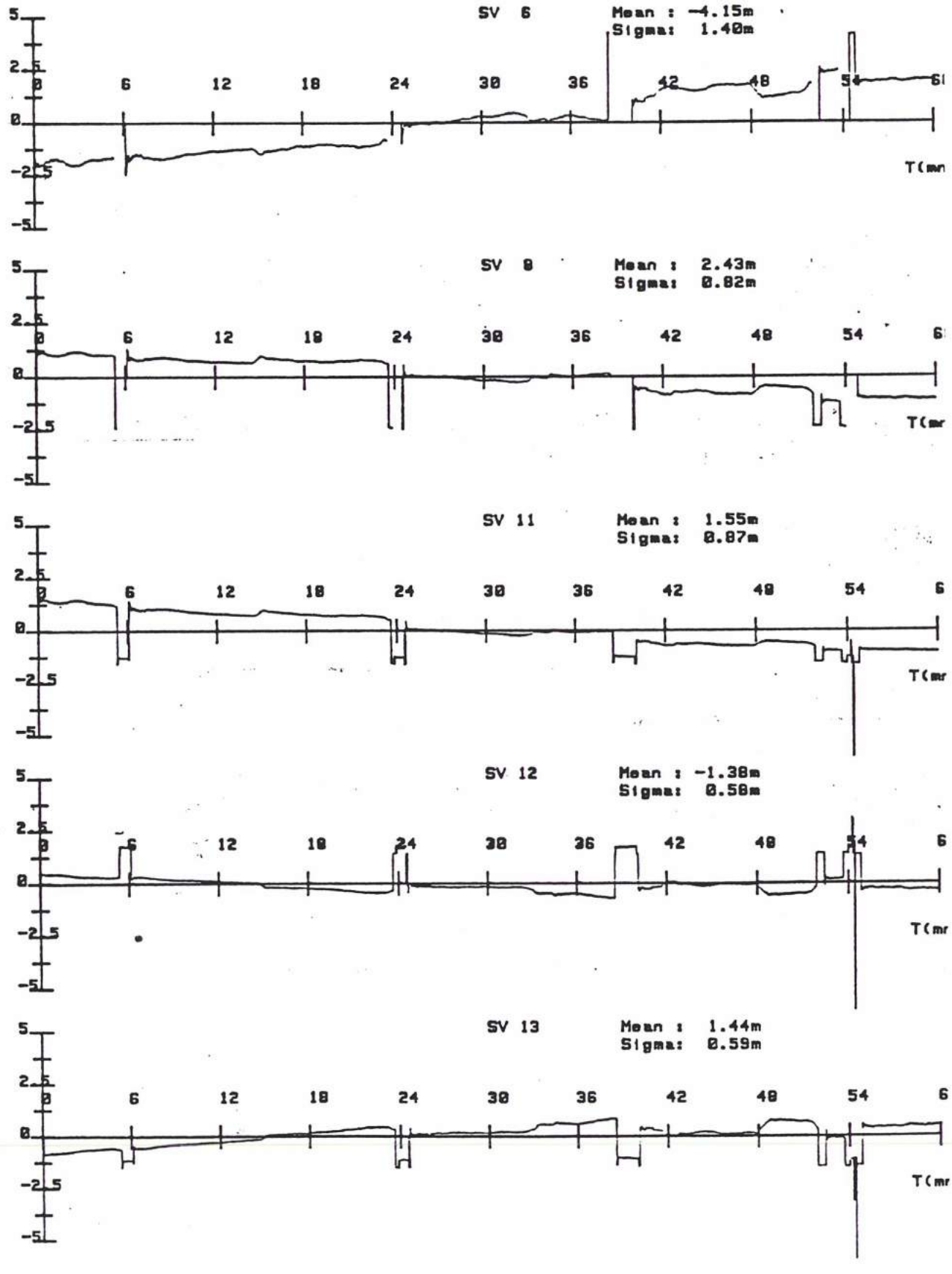
Le calcul des positions des sommets par les pseudo-distances seules, n'avait pas été fait: les résultats de LUNEL ayant été considérés comme suffisants, cette voie était sans avenir immédiat, l'avenir lointain verra sans doute une amélioration et une baisse des prix des matériels, actuellement les "fenêtres G.P.S." utilisables sont trop étroites et trop rarement en face des "fenêtres photogrammétriques" pour qu'une large diffusion des récepteurs provoque cette baisse.

Quatre appuis	
1° Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux points G.P.S	
Trajectographie	Pseudo-dist.lissées par la phase
X= 0,13m	0,46m
Y= 0,14m	0,41m
Z= 0,15m	0,98m

RESIDUALS
43 33.0158'N 4 29.6995'E4500.00m
Mob : LUN/cod-f1 4.0 4001
3D+T R N 50 3
Cal: 0.00-0.35 1.58 0.18-2.52

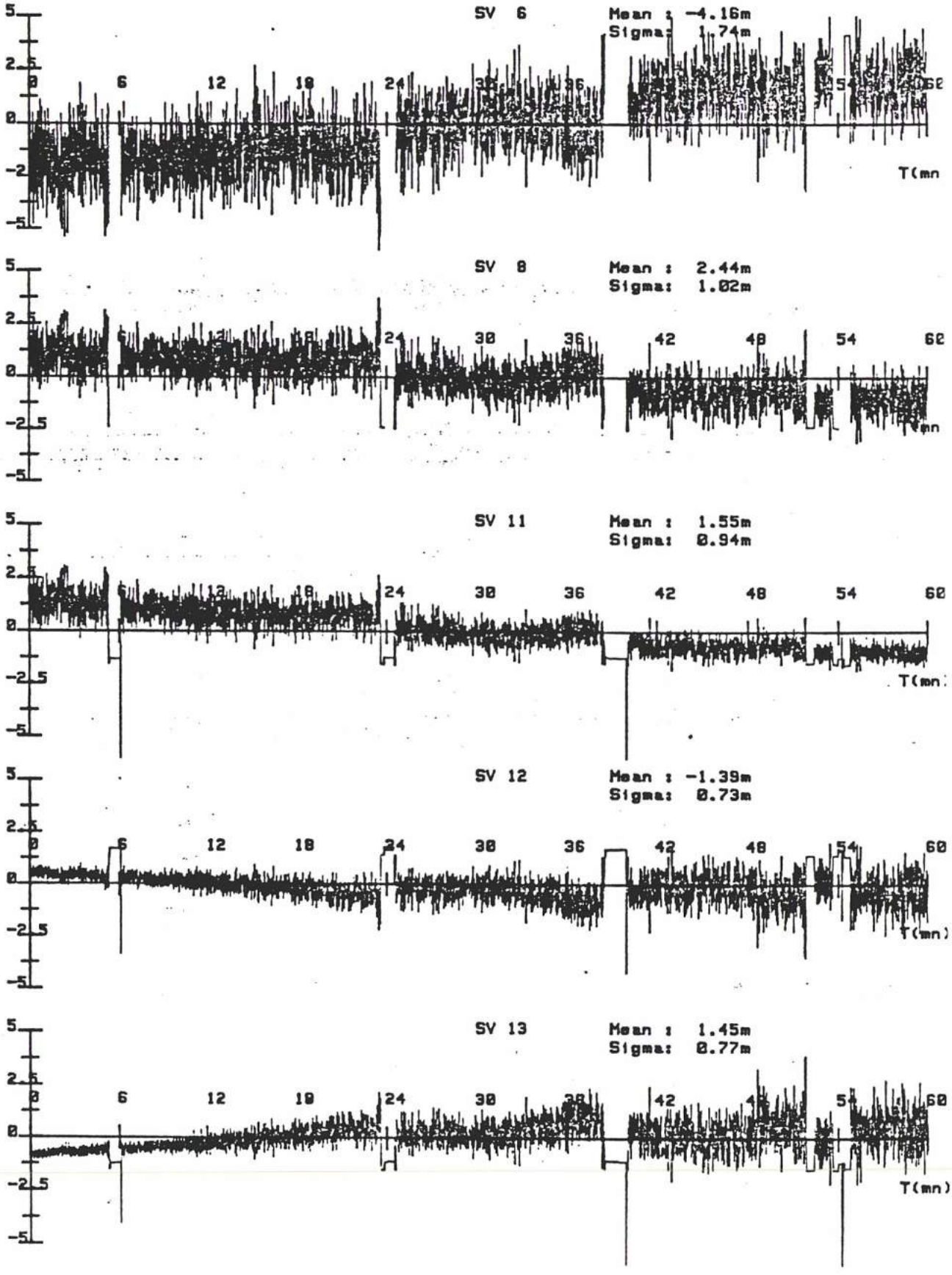
aug 19,1987 7h19m15.2s / 8h19m29.9s
SVs : 6 8 11 12 13

Figure 53



RESIDUALS
43 33.0158'N 4 29.6995'E4500.00m
Mob : LUNEL/code 4.0 4001
3D+T A N 50 3
Cal: 0.00-0.35 1.58 0.18-2.52
aug 19,1987 7h19m15.2s / 8h19m29.9s
SVs : 6 8 11 12 13

Figure 54



74000

76000

160000

160000

140000

140000

Points TERRAIN :

en XYZ

en XY

en Z

inutilise

Ecarts TERRAIN :

ech : 1/100.00

150 cm

ecart altimetrique

20544

HELLE 1:200000

Figure 55

LUNEL ESSAI GPS

ESSAI PSEUDO-DISTANCES LISSEES PAR PHASE

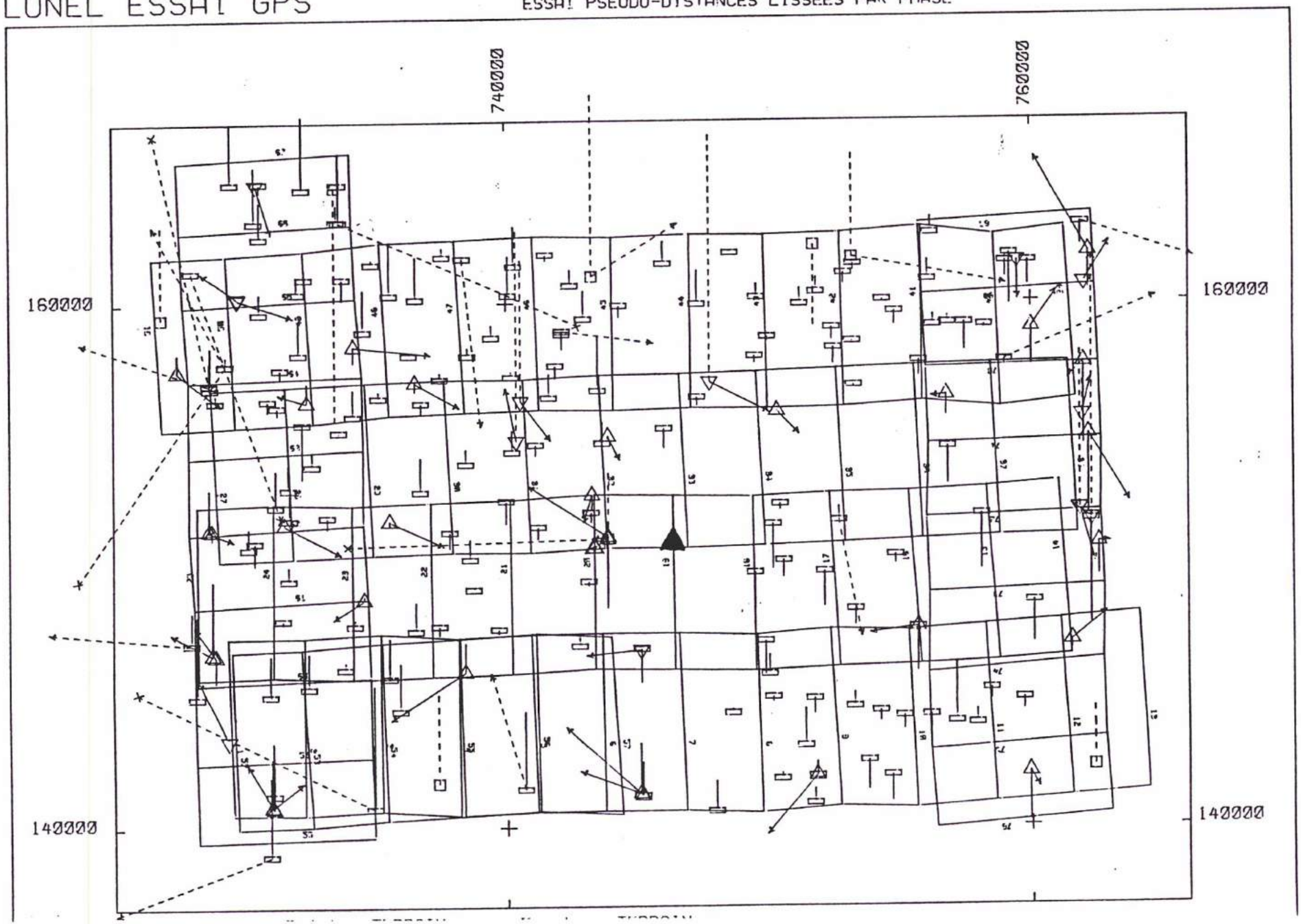


Figure 56

lunel essai gps

essai pseudo-distances seules

74000

76000

160000

140000

Points TERRAIN :

△ en XYZ △

▽ en XY ▽

▭ en Z ▭

▭ inutilisé ▭

Ecarts TERRAIN :

ech : 1/100.00

150 cm

ecart altimetrique

0544

ech. 1:200000

Figure 57

UNEL

ESSAI GPS SEUL PSEUDO-DISTANCES SEULES

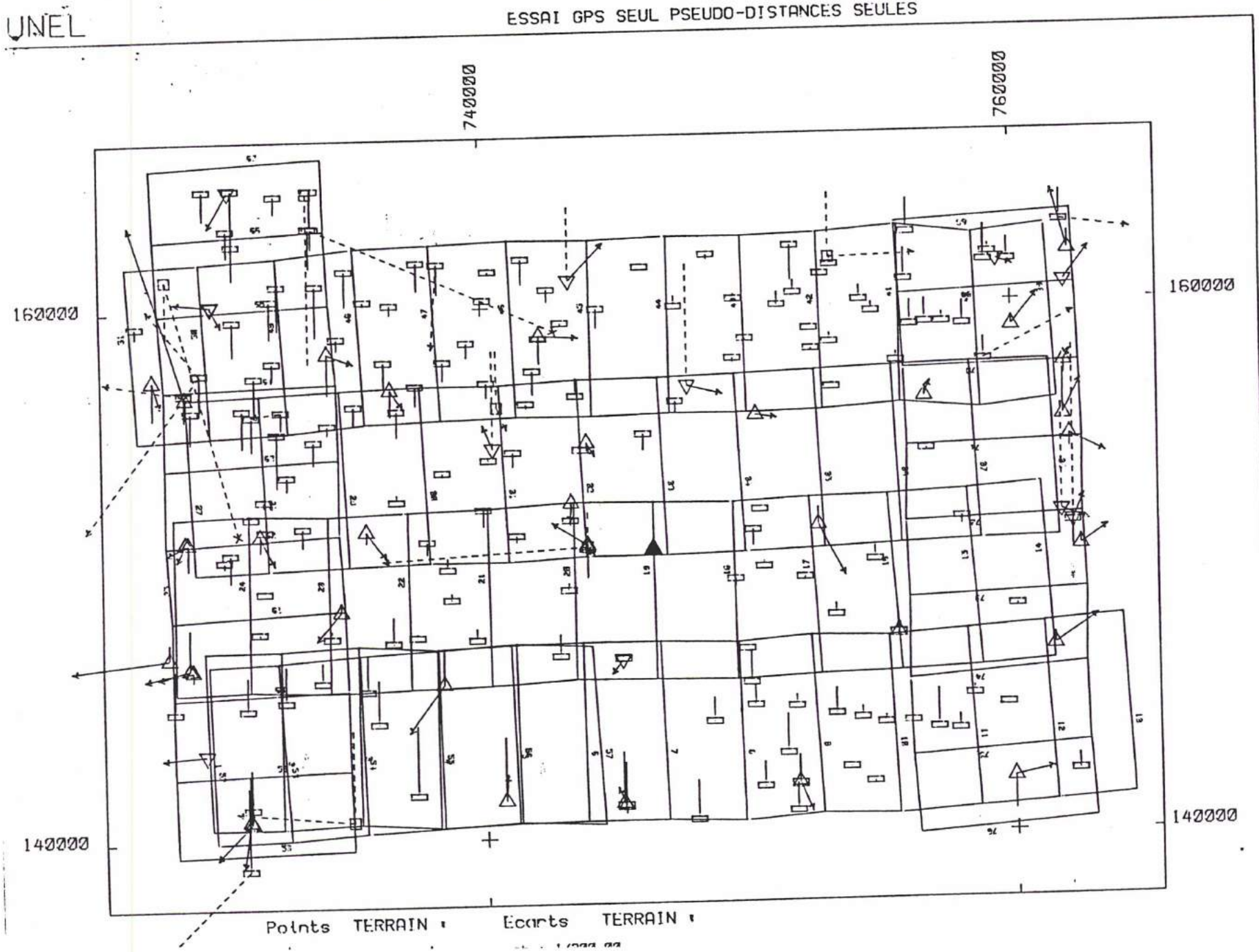


Figure 58

2° Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux appuis

X=	0,70m	0,21m
Y=	0,50m	0,41m
Z=	0,60m	0,30m

3° Ecarts moyens quadratiques aux points de contrôle

	EMQ	BIAIS	ECT TYP	EMQ	BIAIS	ECT TYP
X=	0,56	-0,12	0,55	0,58	0,04	0,58
Y=	0,59	0,30	0,51	0,53	-0,06	0,53
Z=	0,66	0,00	0,66	0,76	-0,04	0,76

Les résultats sont reportés sur un plan à l'échelle du 1/200.000ème Figure 59: les résidus sont assez comparables à ceux obtenus par la trajectographie. Rappelons encore que le calcul des positions des sommets perspectifs par les pseudo-distances lissées par la phase présentent des erreurs indétectable a priori, et que certains sommets ont dûs être éliminés, a posteriori. Il n'est, donc, pas suffisant de constater que les résidus d'ajustements sont comparables à ceux que donne la trajectographie, il faut bien préciser que les résultats sont moins fiables.

Un seul appui fictif

1° Résidus moyens quadratiques d'ajustement aux points G.P.S.

X=	0,25m	0,31m
Y=	0,17m	0,32m
Z=	0,21m	0,72m

2° Ecarts quadratiques moyens sur les points de contrôle

	Trajectographie	Pseudo-distances lissées par la phase
X=	0,65m	0,62m
Y=	0,64m	0,76 m
Z=	0,88m	1,00 m

Les résidus d'ajustement sont reportés sur la figure 60

On se devait d'attirer à nouveau l'attention sur un fait extrêmement important: Alors qu'en utilisant des mesures issues d'un calcul de trajectographie, on n'avait jamais relevé une seule faute dans l'ajustement qui puisse être imputée à G.P.S, il n'en avait plus été de même, dans les essais qui précèdent; des fautes avaient dues être éliminées au cours du calcul, sur des altitudes, notamment. Faute d'éliminer ces mesures aberrantes,

ICHY

GPS. VICHY SUR QUATRE APPUIS P.D LISSEES PAR LA PHASE

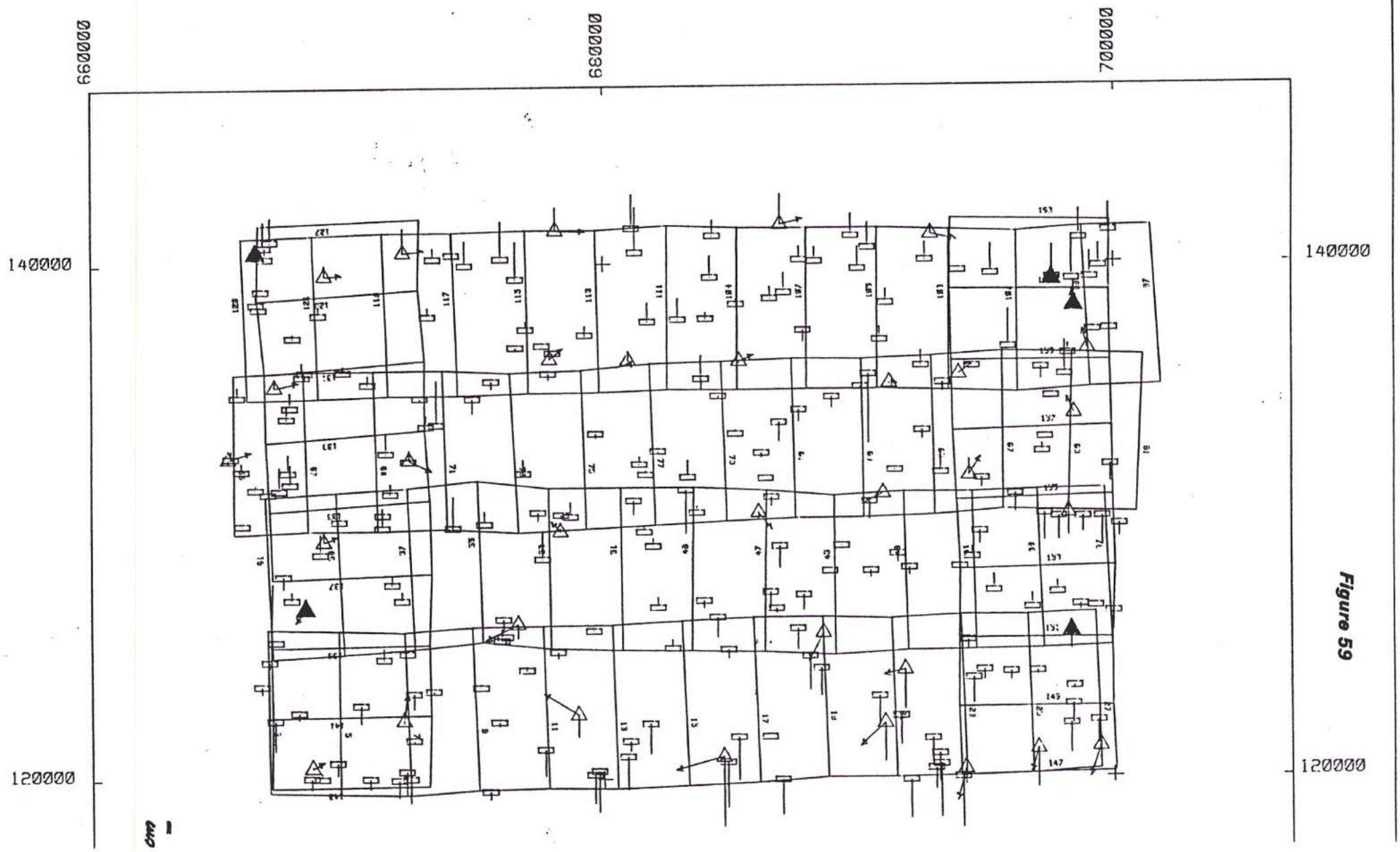


Figure 59

les résultats auraient été beaucoup moins bons; de plus, dans le calcul utilisant les coordonnées des sommets déterminées par les pseudo-distances seules, la procédure d'élimination devrait être revue en fonction des nouveaux écarts-types a priori, en sorte que des mesures considérées comme fausses, lorsqu'on a ajusté le bloc à l'aide des positions des sommets calculées à l'aide des pseudo-distances lissées par la phase, avaient été conservées dans le dernier ajustement, qui ne permettait pas la même précision; il y avait là une anomalie grave, mais inévitable.

Bien qu'aucune compensation n'ait été faite sur le chantier de VICHY à l'aide des coordonnées des sommets perspectifs déterminés par les pseudo-distances seules on montre, sur la figure 60, que le bruit sur les pseudo-distances mesurées, était du même ordre de grandeur qu'à LUNEL.

D.ERREURS ABSOLUES DE TRANSLATION DU BLOC D'ALBERTVILLE.

Il était intéressant de connaître la précision en valeur absolue des coordonnées fournies par le récepteur G.P.S., pour les besoins de la navigation en configuration très dégradée, en s'aidant du capteur de pression de CROUZET pour fournir les altitudes.

Les translations sont données par bandes pour le récepteur G.P.S.

Bande 1 ou A	T_x= - 69,61m	T_y = -8,12m.
Bande 2 ou B	T_x= - 79,53m	T_y = -5,57m.
Bande 3 ou C	T_x= -156,49m	T_y = -6,57m.
Bande 4 ou D	T_x= -201,47m	T_y = 1,29m.
Bande 5 ou G	T_x= -178,68m	T_y = 9,52m.

Translations en altimétrie à partir des altitudes tirées des mesures de pression absolues du statoscope et d'un modèle d'atmosphère correspondant à celui de VICHY.

Bande 1 ou A	T_z= - 19,28m
Bande 2 ou B	T_z= - 19,30m
Bande 3 ou C	T_z= - 19,88m
Bande 4 ou D	T_z= - 20,70m
Bande 5 ou G	T_z= - 19,52m

VICHY ESSAI GPS

ESSAI GPS PS.DIST LISSEES PAR PHASE

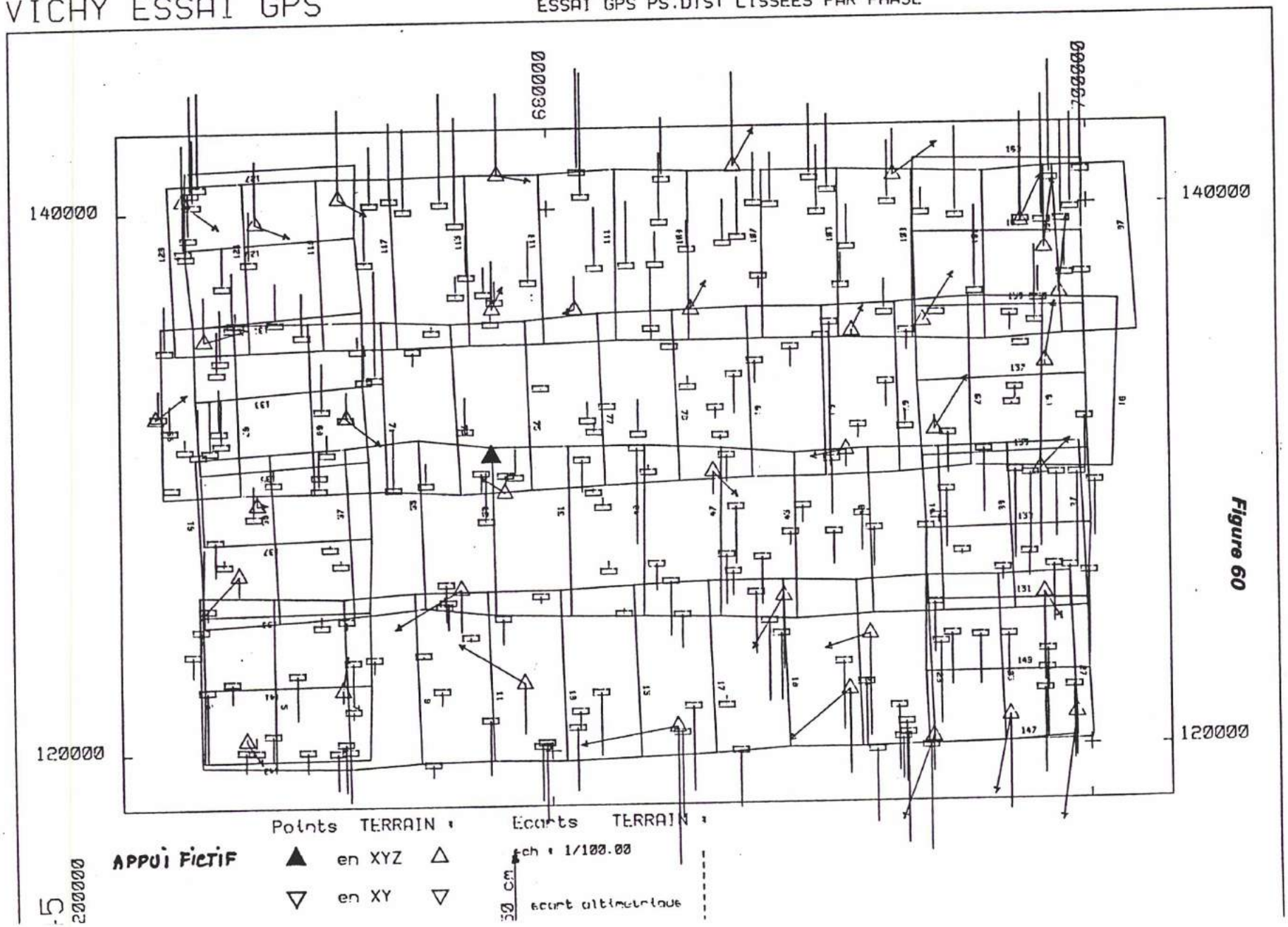


Figure 60

ANNEXE VII. CORRELATIONS DES MESURES INTERNES ET EXTERNES.

A. MESURES EXTERNES: ERREURS SUR LA POSITION DES POINTS DUES AUX ERREURS SUR LES COORDONNES DES SOMMETS.

On travaille sur un couple dont les deux clichés sont notés 1 et 2 .

Soit deux faisceaux perspectifs S_1 S_2 d'un couple exactement reconstitués si on donne à S_1 et à S_2 des déplacements dont les composantes seront:

$$dS_1 = \begin{vmatrix} dX_1 \\ dY_1 \\ dZ_1 \end{vmatrix}$$

$$dS_2 = \begin{vmatrix} dX_2 \\ dY_2 \\ dZ_2 \end{vmatrix}$$

Le point m vrai se partagera en deux points m_1 et m_2 mais le point observé par l'opérateur sera au milieu du vecteur m_1-m_2 l'erreur commise sur sa position sera:

Si B est la base, soit la longueur S_1-S_2 avec les conventions rappelées dans le texte:

$$\begin{aligned} dX &= (X/B).(dX_1-dX_2) + dX_1 + ((B-X)/Z).(dZ_2-dZ_1) \\ dY &= (Y/B).(dX_1-dX_2)+(dY_1+dY_2)/2 + (Y/2.B.Z).(B-2.X).(dZ_1-dZ_2) \\ dZ &= (Z/B).(dX_1-dX_2) + dZ_2 - (X/B).(dZ_2-dZ_1) \end{aligned}$$

Présentées sous ces formes séparant les différents facteurs influant sur les erreurs sur la position des points on constate:

Des effets directs par exemple l'action de dX_1 et dX_2 sur dX qui agissent par interpolation linéaire entre:

$X=0$ $\quad dX = dX_1 + \ldots.$

$X=B$ $\quad dX = dX_2 + \ldots.$

L'action directe de dZ_1 et dZ_2 est la même; par contre l'action directe de dY_1 et dY_2 sur dY intervient par la moyenne :

$$(dY_1 + dY_2)/2$$

Des effets indirects mettant en évidence les raisons des fortes corrélations trouvées au cours des simulations entre les erreurs sur les coordonnées X et Z et plus faibles entre Y et Z.

Toute mesure auxiliaire des coordonnées des sommets perspectifs (G.P.S. ou capteur de pression) aura, par conséquent, un effet direct sur la précision des points au sol qui devrait rester de l'ordre de grandeur de la précision des mesures faites aux sommets perspectifs, c'est tout simplement ce que donnent les simulations, mais pas ce que donnent les essais qui reflètent des effets d'amélioration de la précision des résultats sur les points de contrôle par rapport aux précisions des mesures faites aux sommets perspectifs, ceux des capteurs de pression notamment:

L'explication paraît être la suivante:

On considère que la précision sur une mesure des capteurs de pression est dûe à deux facteurs:

1°/ la mesure elle-même,

2°/ l'erreur sur la définition du référentiel, ceci étant particulièrement évident avec les mesures de pression, puisqu'on se rapporte à une surface totalement hypothétique qui peut présenter des irrégularités physiques qui font que toute amélioration de la qualité de la mesure serait sans intérêt.

Si on forme l'hypothèse que l'erreur sur la mesure elle-même est très faible en regard de l'erreur de définition du référentiel, cette dernière erreur constituerait l'essentiel de l'erreur globale qu'on constate dans les essais ; or la précision globale semble s'améliorer avec la multiplication des mesures d'une bande, ce serait donc la précision de la définition du référentiel qui serait améliorée et qu'on mettrait en évidence dans les essais. Pour les capteurs de pression on comprend comment le référentiel moyen de la bande pourrait être meilleur que le référentiel qu'on ne définirait que par une mesure isolée; pour les mesures des coordonnées des sommets perspectifs par G.P.S c'est beaucoup moins évident, sauf si on se place dans le cas où le référentiel pourrait varier, soit par suite d'une mauvaise géométrie des satellites observés, soit d'une variation rapide de cette géométrie.

Par ailleurs dX est corrélé à dZ_1 et dZ_2 par:

$$(B-X)/E \ *(-dZ_1+dZ_2)$$

cette liaison varie de 0 pour X=B à B/E pour X=0 soit, en gros, dans les exemples proposés, de 0 à 0,53 il se présente alors deux cas:

dZ_2 et dZ_1 sont corrélés, ce qui est vrai dans le réseau photogrammétrique, l'effet de cette corrélation sera alors difficile à apprécier dans les essais.

dZ_1 et dZ_2 ne sont pas corrélés, comme dans les mesures statoscope, on aura par conséquent un effet induit de l'altimétrie sur l'abscisse. Cet effet a été mis en évidence sur les chantiers de VICHY et de LUNEL mais moins sur celui d'ALBERTVILLE.

De même pour l'altitude des points de contrôle l'influence des erreurs sur les abscisses devrait être sensible:

$$\delta Z = (E/B) * (dX_2-dX_1) \text{ soit } \approx 1{,}88.(dX_2-dX_1);$$

or dans les essais de G.P.S en configuration dégradée cette influence n'est pas

sensible, l'explication la plus plausible serait que les erreurs sur les mesures G.P.S.de dX_1 et dX_2 seraient fortement corrélées, en corrélation complète on aurait : $dX_2-dX_1 =0$ et on ne constaterait aucune influence, explication qui rejoint celle donnée plus haut: si ces erreurs sont fortement corrélées, ce pourrait être parce qu'elles dépendent d'erreurs commises sur le référentiel commun.

B.MESURES INTERNES: ERREURS SUR LA POSITION DES POINTS DUES AUX ERREURS DE MESURES SUR LES CLICHES

Si les lettres minuscules représentent les coordonnées mesurées sur les clichés et les majuscules les coordonnées du terrain on reprend la formule classique qui relie l'altitude aux abscisses relevées sur les clichés d'un couple:

$$Z = -B.p/(x_1-x_2)$$

On remarque qu'on peut exprimer X et Y en fonction de Z par :

$$X = -(x_1/p).Z$$

$$Y = -((y_1 +y_2)/2.p).Z$$

On trouve:

$$dZ= E/B.\mu.(dx_1-dx_2)$$

E/B coefficient classique d'éloignement sur la base $\approx 1,88$.

μ echelle des clichés $\mu = Z/p$ ou E/p , généralement 1/30.000ème.

p étant la distance principale, généralement 152mm.

On cherche à rapporter les dernières expressions à la première:

$dX = \mu.dx_1 - X/B .\mu.(dx_1-dx_2)$ résultat très simple qui montre que dX variera linéairement de $\mu.dx_1$ à $\mu.dx_2$

$$dY = \mu.(dy_1+dy_2)/2 + Y/2.B. \mu .(dx_1-dx_2)$$

L'erreur est égale à $\mu.(dy_1+dy_2)/2$, l'influence des erreurs sur les mesures des abscisses clichés est nulle pour Y=0 , au centre des clichés et maximale sur les bords des clichés parallèles au sens du vol où :

$$Y \approx 1,15.B.$$
$$Y/2.B \approx 0,575$$

En pratique , dans les compensations des réseaux photogrammétriques , les écarts-types globaux a posteriori , sont du même ordre de grandeur lorsque les observations sont faites au P.S.K (Stéréocomparateur de précision). Ceci ne peut s'expliquer que si dx_1 et dx_2 sont corrélés , ce qui paraîtrait normal l'observation stéréoscopique des points devant logiquement entraîner ce défaut qui devrait disparaître lorsque les observations sont monoscopiques (Au P.K.1

par exemple)(Comparateur de précision).

C'est ce que l'on constate sur les points balisés observés au P.K.1 lesquels donnent de meilleurs résultats en planimétrie qu'en altimétrie.

Si on admet que lorsqu'on fait des mesures stéréoscopiques les mesures dx_1 et dx_2 sont corrélées et si on veut calculer approximativement le degré de corrélation de ces mesures on peut pour les essais présentés les estimer comme suit:

$$dZ = 1,88 \; . \; 30.000.(dx_1-dx_2) = 0,50m$$

Ce qui donne :

$$dx_1-dx_2 = 8,33\mu m$$

Par ailleurs si on écrit:

$$dX \approx \mu.dx_1 = 0,50m \text{ on a :}$$

$$dx_1 \approx 16,67\mu m \text{ on a alors :}$$

$$8,33^2 = 2.dx_1^2.(1-r)$$

$r = 0,875$ et $\cos^{-1} r = 30°$; les mesures de dx_1 et dx_2 faites sur un même point de détail du terrain m observé au stéréoscope seraient donc fortement corrélées. Les écarts-types a priori à introduire dans les calculs ne pourront qu'être un compromis.

Il est tout de même symptomatique que les valeurs des écarts-types a priori à introduire dans les calculs du programme FAISCEAUX soient plus proches de 17µm, valeur qu'on vient de calculer, que de 5µm correspondants aux écarts-types a posteriori trouvés, dans les circonstances les meilleures, en fin des compensations des blocs. En effet, d'après les essais de confirmation réalisés dans le Service sous la direction de M.Ch.MEYER, on a pu constater que dans les meilleurs des cas les écarts-types a posteriori sont toujours voisins de 5/6µm, mais que pour obtenir des résultats optimaux sur les points de contrôle il était préférable d'adopter, pour écart-type a priori une valeur voisine de 15µm.

Mais il pourrait aussi s'agir d'un défaut de correction des systématismes des clichés par les formules de M.DUCLOUX. M.HOTTIER proposerait d'essayer, à nouveau, les systématismes de d'AUTUME où les déformations aléatoires des clichés.

C.CONCLUSIONS.

Les corrélations, si elles existent, ne sont prises en compte, ni dans les simulations, ni dans les calculs de compensation, on ne les constate même pas a posteriori dans les calculs de compensation où elles faussent, nécessairement, les résultats, en donnant trop de poids aux mesures où elles sont dissimulées.

Elles font perdre beaucoup d'intérêt aux calculs de simulation faits sur des mesures dont on ne connait pas bien

les modèles fonctionnels et stochastiques, or pour connaître ces modèles il faut faire des essais, à la suite desquels les calculs de simulation n'auront plus beaucoup d'utilité. On pourrait en conclure que les calculs de simulation ne serviraient finalement qu'à s'assurer que les essais, qu'il faudra faire de toutes les façons, seront utiles dans la mesure, et c'est tout le problème, où les hypothèses introduites dans les simulations apparaîtront comme exactes; ce qui est rarement le cas.

ANNEXE VIII.

QUELQUES RESULTATS CHIFFRES DES SIMULATION FAITES

A INFLUENCE DE LA POSITION D'UN POINT D'APPUI SUR UN BLOC HOMOGENE

On a étudié l'influence de la position des points d'appui sur un bloc homogène appuyé sur un milieu élastique. Cette disposition montre, de la manière la plus générale, quelles sont les zones du bloc influencées par la présence ou même l'absence d'un point. Le bloc utilisé a été entierement simulé, il comportait 18 bandes de 18 clichés ce qui a permis de profiter des effets de symétrie et même de double symétrie. Les valeurs indiquées sont des coefficients de correlation entre l'altimétrie du point étudié et l'altimétrie des autres points du bloc situés au-dessous du sommet perspectif de chaque cliché.

1 POINT AU CENTRE D'UN BLOC CARRE

0.00	0.20	0.35	0.54	0.61	0.63	0.64	0.65	0.66 X
	0.40	0.50	0.60	0.62	0.65	0.67	0.72	0.75
		0.54	0.63	0.67	0.70	0.73	0.76	0.77
			0.65	0.70	0.76	0.77	0.77	0.78
				0.76	0.77	0.78	0.79	0.80
					0.82	0.83	0.84	0.86
						0.85	0.89	0.91
							0.92	0.95
								0.97
								1.00

2 . POINT AU MILIEU D'UN BORD

0.00	0.25	0.51	0.64	0.72	0.80	0.86	0.92	0.98	1.00
0.26	0.50	0.61	0.70	0.76	0.83	0.85	0.92	0.96	
0.49	0.58	0.64	0.73	0.80	0.82	0.84	0.90	0.90	
0.54	0.62	0.65	0.73	0.77	0.80	0.83	0.86	0.88	
0.58	0.63	0.67	0.72	0.74	0.77	0.79	0.81	0.84	
0.58	0.62	0.66	0.70	0.72	0.74	0.75	0.76	0.80	
0.56	0.60	0.65	0.68	0.70	0.71	0.73	0.75	0.78	
0.53	0.59	0.63	0.66	0.68	0.70	0.72	0.73	0.74	
0.51	0.60	0.61	0.62	0.63	0.65	0.68	0.70	0.70	
----------									X
0.49	0.53	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.63	
0.48	0.52	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.61	
0.46	0.51	0.55	0.56	0.56	0.57	0.58	0.58	0.58	
0.44	0.50	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.56	
0.39	0.46	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.55	
0.31	0.39	0.44	0.50	0.51	0.51	0.52	0.52	0.53	
0.19	0.30	0.40	0.43	0.45	0.48	0.50	0.50	0.50	
0.12	0.21	0.31	0.40	0.41	0.43	0.44	0.46	0.46	
0.00	0.11	0.21	0.31	0.33	0.36	0.38	0.39	0.40	X

3. POINT PLACE DANS UN ANGLE DU BLOC

On remarquera que la zone d'influence de ce point est très faible en altimétrie, mais, à l'inverse,on notera que les deux points précédents n'exercent aucune influence sur les angles; par conséquent il est utile de les appuyer, mais leur action sur les points qui leur sont éloignés restera négligeable.

On peut considérer que les mesures aéroportées,quand elles sont uniformément réparties, ce qui est le cas général lorsque les capteurs ont fonctionné correctement sans défaillances, agissent comme un milieu élastique appuyant le bloc.

1.00	0.75	0.52	0.37	0.21	0.12	0.05	0.03	0.02 X
	0.66	0.41	0.19	0.16	0.08	0.04	0.03	0.02
		0.36	0.15	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02
			0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02
				0.06	0.05	0.04	0.03	0.02
					0.04	0.03	0.02	0.01
						0.02	0.01	0.01
							0.01	0.00
								0.00
								X

B.BLOC NORMAL DE CINQ BANDES APPUYEES A LEURS DEUX EXTREMITES ET AIDEES PAR DES MESURES AEROPORTEES

Dans la simulation suivante, dont on va présenter les résultats, on compare un bloc simulé de cinq bandes de 18 photographies appuyé à ses deux extrèmités, se déformant librement, puis soutenu par des mesures aéroportées, à raison d'une mesure active par cliché, l'écart-type de ces mesures étant de 1,40m. On a présenté en parallèle une bande isolée dont l'écart-type au milieu de la bande libre, c'est-à-dire non aidée par des mesures aéroportées, serait de 6,00m. On met ainsi en évidence l'effet de support des bandes entre elles dans un bloc, et l'apport des mesures aéroportées. Les appuis ont été considéré comme parfaits, si tel n'était pas le cas il faudrait composer quadratiquement l'écart-type sur les appuis à celui indiqué sur le tableau.

Les valeurs indiquées portent uniquement sur les écarts-types en altimétrie.

	BLOC 1	2	x 3		BANDE
1	0,00	0,00	0,00		0,00
2	0,25	0,20	0,18		0,35
3	0,70	0,56	0,51		0,98
4	1,35	1,10	1,00	Sans statoscope	1,90
5	2,13	1,73	1,58		3,00
6	2,90	2,35	2,15		4,10
7	3,56	2,89	2,64		5,02
8	4,01	3,25	2,97		5,65
9	4,25	3,45	3,15		6,00
			X		X
9	1,33	1,30	1,28		1,36
8	1,32	1,29	1,27		1,36
7	1,30	1,26	1,24		1,35
6	1,26	1,20	1,17	Avec statoscope	1,32
5	1,17	1,09	1,05		1,27
4	0,97	0,86	0,81		1,13
3	0,63	0,52	0,48		0,80
2	0,25	0,20	0,18		0,34
1	0,00	0,00	0,00		0,00

****

TABLE DES MATIERES

1	Résumé en anglais	1
2	Remerciements	2
3	Préambule	5
4	Liste des sigles utilisés	11
5	Généralités	13
	5.1 L´Aérotriangulation	15
	5.2 Les mesures aéroportées	16
	5.3 Evolution des aides à la navigation	17
	5.4 L´enregistrement de profils aéroportés	17
	5.5 Le projet de recherche	18
	5.6 Les matériuels utilisés	19
	5.7 Evolution du programme utilisé	21
6	Le bloc photogrammétrique seul	22
	6.1 Le bloc d´aérotriangulation	22
	6.2 Le bloc normal	29
	6.3 Le bloc homogène	30
7	Pondération des différentes catégories de mesures	32
	7.1 Précision et exactitude	35
	7.2 Signification ambiguë de la somme des carrés des résidus	39
	7.3 Critère de la qualité d´une compensation	41
	7.4 Méthode proposée	44
8	La mesure des hauteurs des sommets perspectifs par un télémètre laser	48
	8.1 généralités	48
	8.2 Désignation des chantiers " laser seul"	48
	8.3 Modèles fonctionnels des mesures des hauteurs laser	49
	8.4 Contribution des mesures de hauteurs par laser dans les calculs d´aérotriangulation	53
	8.5 Traîtement des informations	54
	8.6 Les calculs d´aérotriangulation appuyés normalement au sol et servant d´éléments de comparaison	58
	8.7 Les résultats	58
9	Utilisation des capteurs de pression pour appuyer les blocs d´aérotriangulation	63
	9.1 Généralités	63
	9.2 Les chantiers	63
	9.3 Les matériels	63
	9.4 Les modèles des mesures des capteurs de pression	64
	9.5 Modèles des mesures statoscope essayés	71
	9.6 Traîtement des informations	74
	9.7 Les chantiers d´aérotriangulation appuyés normalement au sol et servant d´éléments de comparaison	79
	9.8 Les résultats	80
	9.9 Résumé de l´ensemble des résultats et conclusions sur les mesures des capteurs de pression	90

10 Utilisation d'un capteur de pression et de mesures de hauteurs des sommets perspectifs pour appuyer un bloc d'aérotriangulation 92
10.1 Généralités 92
10.2 Calculs d'aérotriangulation pour le bloc appuyé sur de nombreux points au sol 92
10.3 Les mesures aéroportées 93
10.4 Résultats de la compensation di bloc appuyé sur quelque points u sol et sur les mesures aéroportées 94
10.5 Conclusions et résumé des résultats 96
11 Utilisation du système de positionnement global pour appuyer les blocs d'aérotriangulation 97
11.1 Généralités 97
11.2 Le matériel utilisé 99
11.3 Les mesures 100
11.4 Modèles fonctionnels st stochastiques des mesures 101
11.5 Traitement des informations 113
11.6 Retraitement des coordonnées des sommets 122
11.7 Les chantiers 124
11.8 Les résultats des calculs d'aérotriangulation des blocs appuyés sur de nombreux points au sol pour servir d'éléments de comparaison 124
11.9 Les résultats du calcul des blocs appuyés sur quelques appuis et sur les mesures G.P.S 125
11.10 Conclusions 131
12 Utilisation du système de positionnement global (G.P.S.) en configuration dégradée aidé d'un capteur de pression 134
12.1 Généralités et définition 134
12.2 Modélisation des mesures et dérives des paramétre de translation 135
12.3 Désignation des chantiers utilisés et traitement des informations 136
12.4 Calculs d'aérotriangulation des blocs appuyés sur de nombreux points au sol 137
12.5 Les résultats en configuration dégradée 137
12.6 Résumé des résultats 142
13 Conclusions 143
13.1 Généralités 143
13.2 Les mesures laser 143
13.3 Les mesures des capteurs de pression atmosphériques 144
13.4 Les mesures des coordonnées des sommets perspectifs par un récepteur G.P.S aéroporté 144
13.5 Les mesures combinées 145
13.6 Les modèles des mesures aéroportées 145
13.7 La pondération des mesures hétérogènes biaisées 147
13.8 Les mesures aéroportées qu'on n'a pas utilisées 148
13.9 Typologie des mesures aéroportées 150

14 Références 152

ANNEXES

I Difficultés rencontrées dans la recherche des modèles stochastiques et fonctionnels des mesures aéroportées 156

II La linéarisation de l'équation fondamentale de la photogrammétie analytique 158

A. Généralités 158

B Notations communes aux deux exposés 159

C Calcul des dérivées partielles par rapport aux coordonnées clichés 161

D Calcul des dérivées partielles par rapport aux coordonnées terrain et aux éléments de la matrice de rotation approchée 163

III Le programme FAISCEAUX de l'Institut Géographique National 166

A Description générale 166

B Les calculs des coordonnées approchées des points, des sommets perspectifs, et des attitudes de la chambre 167

C Calcul dit" de préparation" 168

D Compensation globale du système par les moindres carrés: programme dit "calcul des faisceaux" 175

IV Description des missions d'observations exploitées 201

A Généralités 201

B Chantier statoscope seul 201

C Chantier statoscope laser 202

D Chantiers G.P.S. 202

E Chantiers G.P.S et capteurs de pression associés 204

V Les calculs d'aérotriangulation 207

A. Calculs préliminaires 207

B. Chantiers laser seul 208

C. La Souterraine: Laser et capteurs de pression combinés 209

D. Guyane: capteur de pression seul 210

E. Les chantiers G.P.S. 211

F. Chantiers G.P.S. et capteurs de pression combinés 212

VI Les résultats sur les mesures G.P.S 214

A. Vols G.P.S. 214

B. Mesures des positions des sommets par G.P.S à Lunel et à Vichy 221

C. Comparaisons entre les résultats obtenus selon différentes techniques de mesures ou de calcul de G.P.S. et leur influence sur la qualité des points de contrôle 227

D. Erreurs absolues de translation du bloc d'Albertville 232

VII Corrélations des mesures internes et externes 233

A. Mesures externes: Erreurs sur la position des points dûes aux erreurs commises sur les sommets 233

B. Mesures internes: Erreurs sur la position des points dûes aux erreurs des mesures sur les clichés 235
C. Conclusions 236
VIII Quelques résultats chiffrés des simulations faites 238
A. Influence d'un point d'appui sur un bloc homogène 238
B. Bloc normal de cinq bandes appuyées à leurs deux extrémités et aidées par des mesures aéroportées 240
Table des matières 242

OBSERVATOIRE DE PARIS