

MEDDELELSER OM GRØNLAND

UDGIVNE AF

KOMMISSIONEN FOR VIDENSKABELIGE UNDERSØGELSER I GRØNLAND

Bd. 173 • Nr. 2

EXPÉDITION GLACIOLOGIQUE INTERNATIONALE AU GROENLAND

E.G.I.G. 1967-1968 Vol. 2 No. 6

MESURES EFFECTUÉES PAR LE GROUPE
DE GÉODÉSIE B LE LONG DU PROFIL
TRANSVERSAL EST-OUEST
DE L'INDLANDSIS DU GROENLAND
EGIG - ÉTÉ 1967

PAR

JOSEPH VIDAL

WITH 9 TABLES



Nyt Nordisk Forlag Arnold Busck

København 1983

ISBN 87-17-05117-7
Bianco Lunos Bogtrykkeri A/S

Contenu

Avant-propos	4
1. Introduction	7
1.1 Personnel	7
1.2 Mission	7
1.3 Moyens	8
1.4 Calendrier des opérations.....	8
2. Astronomie.....	9
2.1 Déterminations de position: observations.....	9
2.2 Heure	10
2.3 Catalogue.....	11
2.4 Calculs de position	11
2.5 Précision des déterminations de position	12
2.6 Conclusions sur les positions astronomiques.....	13
2.7 Détermination d'azimuts: observations	13
2.8 Calculs d'azimut	13
2.9 Précision des azimuts astronomiques.....	14
2.10 Documentation	17
3. Cheminement géodésique.....	17
3.1 Généralités	17
3.2 Oriementent.....	18
3.3 Mesures de distances	18
3.4 Réduction des mesures tellurométriques.....	20
3.5 Cas particulier de la distance $V3-V5$	21
3.6 Mesures d'angles	21
3.7 Réduction des mesures angulaires	22
3.8 Mesures de rattachement.....	22
3.9 Calcul du cheminement	22
3.10 Calculs de rattachement, reconstitution d'angles et distances.....	23
3.11 Précision des mesures de distances	24
3.12 Précision de mesures angulaires	25
3.13 Mouvements de surface du glacier: effet sur les angles	26
3.14 Mouvements du glacier: effet sur les distances	27
3.15 Justification des azimuts astronomiques.....	28
3.16 Précision de chaque segment	28
3.17 Précision globale du cheminement.....	29
3.18 Conditions d'une exploitation des résultats	30
3.19 Collaboration du <i>Groupe de géodésie A</i>	30
3.20 Documentation	31

4	JOSEPH VIDAL	II
4.	Pentagones.....	32
4.1	Mesures de distances et angles.....	32
4.2	Calculs, résultats, précision.....	32
4.3	Matérialisation des points.....	33
4.4	Documentation.....	34
5.	Activités diverses.....	34
5.1	Navigation.....	34
5.2	Détermination de <i>Inter I</i> et <i>Inter II</i>	35
5.3	Carré de <i>Milcent</i>	35
5.4	Rattachement des balises de longue durée.....	36
5.5	Hauteurs de neige.....	36
5.6	Travaux pour le <i>Groupe de géophysique</i>	36
5.7	Documentation.....	37
6.	Conclusion.....	37
	Liste des documents archivés dans le dossier « GROENLAND 1967 » dans le lot N° 1	39
	Liste des documents archivés dans le lot N° 2.....	40
	Liste des documents archivés dans le lot N° 3.....	41
	Bibliographie.....	42
	Tableaux.....	43

Avant-propos

L'Institut Géographique National (Paris) a participé de plusieurs façons à la réalisation des opérations géodésiques d'*EGIG II*. Lors des réunions préparatoires, ses ingénieurs ont contribué à définir les méthodes et moyens les plus appropriés. Il a préparé et étalonné dans ses laboratoires les telluromètres utilisés par le groupe français; il a fourni les théodolites nécessaires. Le personnel proprement géodésien du *Groupe de géodésie B* appartenait intégralement à *l'IGN*: le responsable, deux opérateurs et un secrétaire. Enfin le dépouillement et l'exploitation des résultats ont utilisé grandement les programmes et ordinateurs de *l'IGN*.

Le présent rapport expose les travaux réalisés en 1967 et les résultats acquis. La valeur du travail ne peut malheureusement être appréciée, faute de terme de comparaison absolu. Il faut s'en tenir aux estimations de précision données dans le rapport. La particularité de ce travail était de mettre en oeuvre des mesures très précises sur un terrain mouvant qui en faisait très vite perdre le bénéfice. Le remède a été de redresser de temps en temps ces mesures géodésiques par des azimuts astronomiques. Ces azimuts sont d'une précision certes modeste, du fait de la latitude et de l'installation matérielle sommaire, mais ils ont l'avantage, dans la limite de cette précision, d'être sûrs. Nous pensons en tous cas que c'est la meilleure méthode possible.

L'Institut Géographique National espère avoir contribué utilement, par cette mise en oeuvre de ses techniques en terrain insolite, à une meilleure connaissance glaciologique du *Groenland*.

G. LACLAVERE

Directeur de *l'Institut Géographique National*

Membre du comité directeur *EGIG*

1. INTRODUCTION

1.1 Personnel

La partie géodésique de la 2ème *EGIG* a été confiée à deux groupes opérant en toute indépendance. Le groupe français, dit géodésie B, était constitué ainsi:

LUCIEN FAIVRE, des *Expéditions Polaires Françaises*, chef de groupe et mécanicien.

JOSEPH VIDAL, ingénieur géographe, responsable scientifique, rédacteur de ce rapport.

JEAN MARCANTONI, ingénieur radio.

PIERRE FRENAY, géodésien.

BERNARD GIBON, géodésien.

JEAN-CLAUDE PIGNAC, secrétaire géodésien.

Le chef de groupe était l'un des hommes les plus expérimentés des *Expéditions Polaires Françaises (EPF)*. Le radio était ingénieur au *Ministère de l'Intérieur*, et avait fait une campagne groenlandaise en 1964. Les 4 géodésiens étaient de l'*Institut Géographique National (IGN)*.

1.2 Mission

Le comité directeur d'*EGIG* avait assigné au Groupe de géodésie B une mission multiple. Essentiellement, redéterminer les positions des balises implantées en 1959, en faisant un cheminement géodésique depuis *Qapiarfut* jusqu'à *Cecilia Nunatak*. Ce cheminement devait être exécuté en mesurant les angles au théodolite et les distances au telluromètre. Il devait être contrôlé aussi fréquemment que possible par des points et azimuts astronomiques. Les autres parties de la mission étaient:

- implanter et mesurer des figures de déformation: pentagones d'environ 7 kilomètres de rayon,
- mesurer des figures installées par le groupe de géophysique,
- relever des hauteurs de neige au pied des balises.

1.3 Moyens

Les Expéditions Polaires Françaises ont mis à la disposition du groupe 3 weasels, tirant l'un une caravane et les deux autres chacun un traîneau. Habillement, nourriture, essence étaient également fournis par les *EPF*.

Le matériel technique appartenait pour l'essentiel à *l'Institut Géographique National*:

- 2 théodolites KERN DKM3 nos 42740 et 42742,
- 2 théodolites WILD T3 nos 33376 et 29773,
- 1 théodolite WILD T2 n° 46303,
- Chronomètres, projecteurs, miroirs, trépieds, thermomètres etc. . . .
- Un récepteur radio ANGRC 9.

Etaient fournis par les *EPF*:

- 4 telluromètres MRA2,
- 3 altimètres THOMMEN,
- l'émetteur-récepteur équipant le weasel radio,
- pièces de rechange, outillage, etc . . .

Pendant les opérations sur la côte Ouest, le *Groupe de géodésie B* a bénéficié de l'appui de deux hélicoptères Alouette II.

1.4 Calendrier des opérations

- 20 et 21 avril 1967 — Voyage *Paris-Copenhague-Søndrestrømfjord* par les avions réguliers de la SAS, pour les 4 géodésiens.
- 27 avril — Arrivée à *Dye II* par C 130, où nous rejoignons FAIVRE et MARCANTONI partis en précurseurs environ un mois plus tôt. Tout l'équipement a été apporté là par C 130, et préparé au départ par les précurseurs.
- 29 avril – 18 mai — Voyage jusqu'à *Station Centrale*, en compagnie des autres groupes jusqu'à *Inter II*, seuls ensuite. Constitution du dépôt et détermination des coordonnées de *Inter I* le 8 mai, de *Inter II* le 15 mai. Pendant ce voyage, nous assurons la navigation.
- 19 mai – 26 mai — *Station Centrale*: travaux pour le Groupe de géophysique, implantation et mesure d'un pentagone.
- 28 mai – 3 juin — *Milcent*: travaux pour le Groupe de géophysique, implantation et mesure d'un pentagone.

- 5 juin – 7 juin — *Carrefour*: travaux pour le Groupe de géophysique, implantation et début de la mesure du pentagone.
- 8 juin – 24 juin — Début du cheminement *Qapiarfit-V7*, en hélicoptère, entrecoupé d'un séjour à *Carrefour* avec achèvement du pentagone. Gêne considérable du mauvais temps et de la faible autonomie utile des hélicoptères.
- 25 juin – 3 août — Cheminement de *V7* à *Cecilia Nunatak*: 91 stations, appuyées de 7 points et 8 azimuts astronomiques.
- 6 août – 21 août — Retour vers *Carrefour*, avec mesure de 3 pentagones de la *Géodésie A*:
Dépôt 420 les 8 et 9 août.
Jarl Joset les 11 et 12 août.
Crête les 14 et 15 août.
- 22 et 23 août — Emballage du matériel qui sera convoyé jusqu'à *Dye II* par une équipe comprenant FAIVRE et GIBON.
- 24 – 31 août — Retour des quatre autres membres du groupe: *Carrefour-Jakobshavn* en hélicoptère, *Jakobshavn-Søndrestrømfjord* en bateau, *Søndrestrømfjord-Paris* via *Copenhague* par courrier régulier SAS.

2. ASTRONOMIE

On a déterminé les positions de 7 points du cheminement: *V7*, *U4* (*Carrefour*), *U16*, *U25*, *U53* (*Jarl-Joset*), *TN65*, *T72* (*Cecilia*) et les azimuts en ces points plus un huitième en *U38*. L'azimut en *V7*, fait dans de mauvaises conditions, n'a pas été utilisé dans les calculs de géodésie.

2.1 Déterminations de position : observations

La méthode est celle des droites de hauteur, les passages d'étoile étant observés par le procédé dit des tops cadencés. Un chronomètre de marine en temps sidéral laisse entendre dans des casques que portent l'opérateur et le secrétaire un top toutes les 4 secondes. L'observateur suit constamment le mouvement de l'étoile qui traverse un réticule à 11 fils horizontaux en passant par le centre du champ. Pour chaque top, à partir du moment où l'étoile a franchi le 1er fil jusqu'à celui où elle va dépasser le 11ème, l'observateur apprécie la fraction d'intervalle depuis le dernier fil franchi et l'annonce sous la forme d'un chiffre de 0 à 9. Avec l'intervalle de 4 secondes, on obtenait ainsi une trentaine de pointés par étoile. Un

calcul simple permet d'interpoler l'heure de passage sur le fil central. Aussitôt après les observations on faisait deux lectures de la distance zénithale. Variante pour deux étoiles au déplacement vertical très lent (polaire et Véga qui se trouvait pratiquement au Sud): pointé avec le fil central à un top; et deux lectures de la distance zénithale, ceci répété 5 fois.

Sauf en *V7* et *Cecilia*, la station astronomique était à quelques mètres du point géodésique, de façon que le rattachement puisse être négligé. Le weasel était placé de façon à abriter la station du soleil. Le secrétaire était dans le weasel, moteur froid, sans chauffage, pour que la marche du chronomètre ne soit pas perturbée par des variations de température. La température et la pression, pour évaluation de la réfraction, étaient mesurées au début, à la fin et quelquefois en cours de séance.

À part les deux premiers points, où l'on a rodé la méthode et aguerri les participants, les stations comptent une douzaine d'étoiles, aussi bien réparties que possible en azimut. L'appareil était un KERN DKM3. L'oculaire coudé donnait de mauvaises images sur les bords du champ. Les étoiles ayant généralement une course peu inclinée sur l'horizontale, les premières et dernières observations se faisaient loin de l'axe et étaient donc difficiles et sans doute mauvaises. Le trépied (type RAGUET) était enfoncé sur un sol préalablement tassé par passage du weasel. Un bloc de neige sur chaque pied était arrosé, de façon à former un solide glaçon, et à abriter les extrémités métalliques du rayonnement solaire.

2.2 Heure

Le chronomètre était comparé aux signaux horaires en temps moyen émis par les stations de WWV ou NAUEN. On utilisait la méthode et l'appareillage des coïncidences, qui donnent sans difficulté l'heure du chronomètre, au centième de seconde, pour une minute ronde en T.U. On ajoute à ce T.U. l'heure sidérale Greenwich à 0 heure et l'appoint de temps moyen à temps sidéral pour obtenir l'heure sidérale Greenwich correspondant à la lecture du chronomètre. D'où une différence, dite CPG (correction de pendule pour Greenwich) qu'il suffit d'ajouter à l'heure du chronomètre pour avoir l'heure sidérale Greenwich. Ces comparaisons étaient faites plusieurs fois, immédiatement avant et après les observations des étoiles. Elles faisaient apparaître une dérive linéaire du CPG, de quelques centièmes de seconde par heure. Le CPG de chaque observation d'étoile est ensuite interpolé entre ces valeurs initiales et finales.

2.3 Catalogue

Les observations ayant lieu dans un ciel éclairé par le soleil de minuit, on ne voyait que des étoiles de bonne magnitude, pas trop loin du zénith, et à condition de les avoir amenées dans le centre du champ du théodolite. Pour cela on disposait d'un catalogue, élaboré avant le départ sur l'ordinateur IBM 1130 de l'IGN.

On avait sélectionné dans le FK4 une cinquantaine d'étoiles, par magnitude croissante, et dont la déclinaison les rendait théoriquement visibles des latitudes où l'on observait. Les données communiquées à l'ordinateur étaient, pour chaque étoile: le numéro, la magnitude, l'ascension droite et la déclinaison moyennes pour l'été 1967. Les résultats étaient, sur une page, à raison d'une ligne par étoile, ses azimuth et distance zénithale pour une latitude donnée et pour une tranche de temps de 1 heure, de 6 en 6 minutes, soit 10 valeurs. Le temps était en heure sidérale locale (HSL). Par latitude, on imprimait 11 pages, correspondant à l'intervalle d'HSL de 13 heures à 24 heures. Ce groupe de 11 pages était répété pour 36 latitudes, espacées de 5 minutes sexagésimales, couvrant tout le parcours de la mission. L'intervalle de 13 à 24 HSL permettait d'observer du 8 mai au 23 août, et pendant deux heures avant et après le minuit local. Le découpage en tranches de 6 minutes de temps et 5 minutes de latitude avait été calculé pour que en tout lieu et à tout moment, les indications du catalogue les plus voisines permettent de situer l'étoile dans le centre du champ, sans qu'aucune interpolation soit nécessaire.

Ce catalogue était très volumineux (400 pages) mais a rendu les opérations de terrain très faciles. L'opérateur orientait son appareil sur la balise précédente, en adoptant l'azimut mesuré en 1959. Le secrétaire mettait sa montre personnelle à l'heure sidérale locale: heure du chrono + CPG + longitude 1959. On mettait l'appareil sur l'azimut et la distance zénithale annoncés par le catalogue pour une très grosse étoile. Si elle n'était pas exactement visible au centre du champ, du fait de l'imprécision sur l'orientation de l'appareil, on la trouvait sans peine par un court balayage horizontal. Sur cette première étoile, on précisait l'orientation du théodolite pour la mettre en accord avec les azimuths du catalogue, et il n'y avait plus de difficulté ensuite pour trouver les étoiles.

2.4 Calculs de position

Sur place, dès le lendemain de la soirée, le secrétaire calculait les heures de passage au centre et les CPG de chaque étoile. Le reste des calculs a été fait à l'aide de l'ordinateur 1130 de l'IGN, en utilisant deux programmes standard de l'IGN, modifiés pour s'adapter aux circonstances.

Sauf l'heure, tous les angles ou coordonnées sont dans le système centésimal.

Un premier programme lit les données suivantes: pour chaque station, coordonnées approchées, date; pour chaque étoile: numéro FK4, heure du chronomètre, CPG, température, pression, distance zénithale observée.

Les résultats imprimés sont, par étoile: rappel des données, ascension droite, déclinaison, réfraction, distance zénithale théorique, différence en distance zénithale, azimut de l'étoile, longueur à porter en mm si on veut une solution graphique.

Le deuxième programme lit par station: coordonnées approchées, écarts en latitude et longitude pour rattacher la station au point géodésique; par étoile: numéro, azimut et écart en distance zénithale fournis par le 1er programme. Le programme compense les mesures par moindres carrés. Il imprime, outre les données, les erreurs moyennes et les variations en coordonnées résultant de la compensation qui, ajoutées aux valeurs approchées et aux éléments de rattachement, donnent les coordonnées astronomiques du point géodésique. Après calcul de la géodésie, ce programme repasse une deuxième fois, avec comme données supplémentaires les coordonnées géodésiques, et il imprime les écarts astronomie moins géodésie, en secondes et en mètres.

2.5 Précision des déterminations de position

Pour de multiples raisons, la précision de ces mesures astronomiques ne pouvait qu'être mauvaise. Les conditions d'éclairement limitaient le nombre d'étoiles utiles et il était pratiquement impossible d'en trouver plus de 12 qui conviennent. L'opérateur passait environ deux heures (point et azimut) entre -8° et -23° en devant faire le moins de mouvements possible, pour la stabilité du pied, et ne pouvant aller se réchauffer car à son contact le théodolite aurait subi des torsions du fait de variations de température; cet inconfort physique diminuait certainement la précision des pointés. On a déjà dit que les mesures sur les bords du champ étaient mauvaises. Enfin la rareté des étoiles obligeait à travailler en hauteurs quelconques, d'où deux inconvénients par rapport à la méthode habituelle à l'IGN des hauteurs égales: d'abord lecture des distances zénithales sur le cercle de l'appareil, avec les aléas dus aux variations de z_0 et aux irrégularités de graduation; ensuite effet direct de l'incertitude sur la réfraction, la différence de réfraction entre deux étoiles allant jusqu'à 1 minute, exceptionnellement 2.

L'imprécision redoutée a priori est confirmée par les résultats: les erreurs moyennes intrinsèques sont de l'ordre de 5 secondes centésimales en latitude et 15 en longitude (effet multiplicateur de 3 environ de

$\cos \varphi$). Les erreurs absolues, ajoutant aux erreurs intrinsèques les effets de la déviation de la verticale et de l'équation personnelle, sont fournies par la comparaison avec la géodésie: environ $10''$ en latitude soit 100 mètres et $20''$ en longitude soit 60 mètres.

2.6 Conclusions sur les positions astronomiques

Les résultats obtenus sont ceux que l'on pouvait normalement espérer, compte tenu des circonstances. Ils sont sans commune mesure avec la précision de la géodésie. Ces déterminations étaient-elles alors essentielles à la rectification des azimuts par la formule de Laplace? Nous verrons plus loin qu'il n'en est rien, si l'on observe un astre bas sur l'horizon. Nous préconisons donc que dans de futures semblables expéditions on ne mette plus au programme de déterminations astronomiques de position; sinon des déterminations expédiées de reconnaissance, comme on en a fait à *Inter I* et *Inter II*.

2.7 Détermination d'azimuts: observations

Les mesures d'azimut ont été faites par observation du soleil aux environs du minuit local, c'est-à-dire quand il était bas sur l'horizon. L'appareil était un KERN DKM3, avec un réticule à 11 fils verticaux. Le tripode RAGUET était centré très exactement sur le point géodésique: axe d'une balise verticale (repère à *Cecilia*). Par la méthode des tops cadencés déjà exposée, on notait les passages du bord antérieur du soleil parmi les 11 fils, comme on l'aurait fait pour une étoile. Avec une cadence de 2 secondes, on avait chaque fois une vingtaine d'observations. Aussitôt avant observation du soleil on pointait une référence, puis on positionnait l'appareil un peu en avant du soleil, on faisait 3 lectures d'azimut. Ensuite, sans toucher l'appareil, venaient les observations de passage puis 2 autres lectures d'azimut qui devaient corroborer les 3 premières. Enfin, fermeture sur la référence. Cet ensemble d'opérations était répété trois fois, avec changement d'origine et de cercle.

Aux heures d'opération, les visées à longue distance étaient impossibles à cause de la vibration atmosphériques. On utilisait donc comme référence un fanion de balisage, le plus loin qui soit bien observable, généralement le 3e ou le 4e, soit à une distance de 1200 m à 1600 m. Dès que la visibilité était devenue bonne le lendemain matin, on mesurait l'angle entre ce repère et le point géodésique précédent, l'appareil étant resté en station pendant la nuit.

2.8 Calculs d'azimut

Comme pour les observations d'étoiles, le secrétaire calculait immédiatement l'heure chrono de passage du soleil sur le fil central et les CPG.

Il réduisait également à leur moyenne les mesures d'angles et vérifiait que les différentes séries se tenaient dans les tolérances.

Les azimuts ont été calculés ensuite sur l'ordinateur IBM 1130 de l'*IGN*. Le programme est une variante, faite pour cette occasion, du programme *IGN* de calcul de l'azimut par l'heure. Les données sont:

coordonnées approchées φ et M	
heure sidérale Greenwich	
lectures sur le repère et sur le soleil	
diamètre apparent	} lus dans des tables du soleil
ascension droite et déclinaison	

La liste obtenue rappelle les données et y ajoute les résultats
 azimut du soleil
 azimut du point géodésique précédent.

La formule utilisée est:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} A &= \sin AH / (\sin \varphi \cos AH - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta) \\ \text{avec } A &= \text{azimut du centre du soleil} \\ AH &= \text{Heure sidérale Greenwich} + \text{longitude } M - \text{ascension droite} \\ \delta &= \text{déclinaison du soleil} \end{aligned} \quad (1)$$

On passe à l'azimut du repère en ajoutant demi-diamètre/sin z et l'angle soleil-repère.

Les calculs sont faits séparément pour chacun des 3 soleils observés à chaque station, la moyenne étant faite ensuite à la main.

2.9 Précision des azimuts astronomiques

La précision des azimuts astronomiques est une question de première importance, puisqu'elle conditionne l'exactitude de l'orientation du cheminement géodésique. Les erreurs qui entachent la détermination d'azimut peuvent se classer en 2 groupes: erreurs dans l'azimut du soleil et erreur dans le passage du soleil au point géodésique de référence.

Nous évaluerons les premières en étudiant l'équation obtenue en différenciant la formule (1) qui donne l'azimut:

$$dA = \cotgz \sin A d\varphi + (\sin \varphi - \cotgz \cos \varphi \cos A) dAH + \beta \cotgz \quad (2)$$

Notations: A = azimut
 z = distance zénithale
 φ = latitude
 AH = angle horaire
 β = inclinaison de l'appareil

Le terme $\beta \cotgz$, ajouté à la formule différentielle, traduit l'effet d'une inclinaison de l'axe vertical de l'instrument, dans le plan perpendiculaire à celui de la visée.

Le tableau N° 1 donne pour chaque azimut la valeur des coefficients des inconnues $d\varphi$, dAH , β . On voit que pour que l'erreur sur l'azimut due à $d\varphi$ atteigne $1''$, il faut une erreur de latitude de $5''$ en *U53*, $7''$ en *TN65* ou $8''$ en *Cecilia*, soit de 50 à 80 mètres en position. Nous établirons que la précision finale sur le cheminement géodésique est bien meilleure que celà. Par conséquent l'incertitude sur φ est sans effet sur l'azimut.

L'erreur sur AH est plus importante, car multipliée par un facteur 0,92 ou 0,93. L'angle horaire est formé de 3 éléments: l'heure sidérale Greenwich, la longitude, l'ascension droite du soleil. Sauf faute de lecture dans les tables, l'ascension droite est parfaite. L'heure de l'observation supposée est également parfaite (1/100 sec assuré) de par la méthode et l'appareillage employés; par contre entre l'instant supposé d'observation et l'instant réel intervient le retard ou l'avance de l'observateur dans sa liaison oeil-oreille: l'équation personnelle.

Cette équation comporte une partie constante pour un individu, généralement inférieure à 2/10 sec. Une partie variable dépend des conditions physiologiques du moment; admettons que 2/10 sec est aussi une borne supérieure pessimiste.

Un dixième de seconde d'erreur sur l'heure, converti en secondes centésimales et multiplié par le facteur 0,92 équivant à $4''$, 2 d'erreur sur l'azimut.

L'équation personnelle se répercute donc sur l'azimut par une erreur systématique et une erreur accidentelle pouvant atteindre chacune $8''$. Parlons maintenant de l'incertitude sur la longitude. $1''$ de longitude vaut environ 3 mètres. Même si l'accumulateur des erreurs de mesure de distance, qui sont grosso modo Est Ouest, atteignait cette valeur, il en résulterait sur les longitudes des erreurs allant de $0''$ au départ à $1''$ en *Cecilia*, soit quelque chose de négligeable. Quant à un défaut d'orientation du cheminement, même systématique, même atteignant $20''$, ce qui est énorme, il se traduirait par un défaut de position allant de 0 à 25 mètres environ en *Cecilia*, dont la composante en longitude irait de 0 à 7 mètres environ, soit 0 à $2''3$; les azimuts en seraient entachés de 0 à $2''$ et l'erreur résultante serait par exemple inférieure à 1 mètre sur la position de *Jarl-Joset*, et de 1,3 mètre sur celle de *Cecilia*. Donc les effets sur l'azimut des incertitudes sur la longitude sont négligeables.

Reste le terme en β . La verticalité apparente du théodolite se contrôle par une nivelle dont chaque division représente $30''$. Dans les conditions groenlandaises, il n'est pas possible d'assurer le maintien de la verticalité à mieux qu'une demi-division, soit $15''$. La verticalité vraie diffère de l'apparente par les défauts de construction, qui peuvent

atteindre 10" même pour un bon appareil. L'ensemble de ces considérations peut faire craindre une erreur allant jusqu'à 20". Mais, multiplié par $\cotg z$ qui va de 0,05 à 0,21, l'effet est négligeable jusqu'à $U38$ inclus et de 3" à 4" pour le dernier tiers du cheminement, ce qui est aussi négligeable (4" sur 250 kms = 1,4 mètre).

Pour nous résumer, toutes les causes d'erreur sur l'azimut du soleil autre que l'équation personnelle peuvent être négligées. Cette dernière se traduit par une erreur systématique pour l'ensemble du cheminement et une erreur variable avec chaque mesure. Chacune vaut 4" pour une équation de 1/10 seconde.

Un autre groupe d'erreurs intéresse la mesure de l'angle entre le soleil et un repère fixe. On a déjà dit qu'on passait par l'intermédiaire d'un repère proche. Les erreurs dues à l'imprécision des pointés sur le bord un peu mouvant du soleil sont inchiffrables a priori. Elles constituent certainement la raison essentielle des dispersions constatées sur les résultats. La mesure de l'angle entre le fanion repère et la direction où on avait bloqué le théodolite pour un passage du soleil se faisait par 5 pointés sur le repère et 3 lectures sur le soleil avant les observations, puis 2 lectures sur le soleil et 5 pointés sur le repère après. On peut estimer que chaque angle était ainsi mesuré à 5" ou 10" près. Le rattachement ultérieur du fanion repère au point géodésique arrière choisi comme référence était fait par 4 couples à 5 pointés, qui donnaient vraisemblablement mieux que 5" sur la moyenne retenue.

Au total, les azimuts astronomiques sont a priori entachés des erreurs suivantes:

- une erreur systématique due à la partie constante de l'équation personnelle, de 4" pour 1/10 sec.
- une erreur accidentelle résultant de la combinaison de 4 éléments:
 - variation de l'équation personnelle, inconnue, 4" par 1/10 sec,
 - imprécision du pointé sur le bord du soleil, inchiffrable,
 - rattachement du repère intermédiaire: 5" à 10",
 - passage au repère définitif: 5".

La dispersion effectivement constatée entre les 3 mesures d'un même azimut traduit la résultante des 3 premiers éléments.

Le tableau N° 2 donne pour chaque point les écarts à la moyenne de chacune des 3 mesures, et l'erreur moyenne quadratique qui en résulte: $EMQ^2 = \Sigma (\text{écart})^2 / (3-1)$. Il est certain d'ailleurs que l'erreur réelle est inférieure à celle ainsi théoriquement établie. En effet, par exemple, la moyenne de 2 mesures parfaites d'un angle avec décalage de 100 grades des origines serait rigoureusement correcte, tout en présentant les apparences d'une dispersion due à un défaut de centrage de l'axe du théo-

dolite sur le cercle. La dernière colonne donne l'erreur moyenne quadratique totale, en ajoutant à la précédente le dernier terme estimé à 5", par la formule: $(\text{erreur totale})^2 = \text{EMQ}^2 + (5'')^2$.

2.10 Documentation

On trouvera en annexe à ce rapport:

Tableau N° 1, les coefficients des inconnues $d\varphi$ et dAH des azimuts.

Tableau N° 2, les écarts à la moyenne et l'erreur des azimuts.

Tableau N° 3, les résultats des déterminations astronomiques de position.

Tableau N° 4, les résultats des mesures d'azimut astronomique.

Dans le dossier «GROENLAND 1967», archivé à *l'Institut Géographique National, 2 avenue Pasteur, (94) Saint-Mande, France*, outre les tableaux reproduits en annexe, on trouvera:

- Un extrait du catalogue astronomique utilisé,
- Les originaux des observations de passages d'étoiles ou du soleil, 9 pages numérotées de 1 à 9,
- Les originaux des mesures angulaires de rattachement soleil-repère:
8 feuillets de 4 pages, numérotés de 1 à 8,
- Le cahier original des comparaisons chronomètre-radio,
- Un listing des 4 programmes FORTRAN utilisés:
calcul des étoiles,
calcul des points astronomiques,
calcul des azimuts astronomiques,
calcul du catalogue.

3. CHEMINEMENT GÉODÉSIQUE

3.1 Généralités

Le cheminement va de *Qapiarfit*, point géodésique de la côte Ouest, à *Cecilia Nunatak*, îlot rocheux près de la côte Est. Il comporte 95 portées dont la somme des distances fait environ 950 kms. Son exécution a duré du 8 juin au 3 août 1967 soit 57 jours dont 17 pour les 5 premières stations faites en hélicoptère et 40 pour les 90 autres en weasel. Les angles ont été mesurés avec des théodolites WILD T3, les distances avec des telluromètres MRA 2. Les stations sont de 4 sortes:

- les balises de 1959; exemple $T\ 2/8$, haut du 8e élément de $T2$,
- des balises nouvelles, provisoires, au voisinage de balises 1959, appelées U; exemples:

$U\ 11$ à 1.034 mètres de $T\ 11/8$

$U\ 17$ à 0,61 mètre de $T\ 17/6$

- des balises nouvelles, provisoires, dans la région Ouest où il ne restait rien de 1959, baptisées *VI* à *V7*,
- des balises nouvelles, définitives, remplaçant approximativement des balises 1959 disparues à l'Est; exemple *TN 63* aux environs de l'ancien *T 63* disparu.

Les 94 stations ont été choisies en fonction de la topographie, avec un double souci. D'une part joindre *Qapiarfit* à *Cecilia* en un minimum de portées, ce qui réduisait d'autant les erreurs accumulables; d'autre part utiliser chaque fois que possible les balises 1959 pour limiter les mesures et calculs de rattachement.

3.2 Orientation

En *Qapiarfit*, on a orienté le tour d'horizon en observant 3 points géodésiques. Chacun des 3 points était observé successivement; un projecteur y était installé par hélicoptère et la direction rattachée à une référence par 8 couples à 5 pointés. La référence était *Manitsoq* point fixe, non géodésique, déjà utilisé en 1959, et où l'on avait aussi un projecteur. On a ainsi déterminé le gisement *Qapiarfit-Manitsoq* avec une précision de l'ordre de 2", et retrouvé d'ailleurs la valeur de 1959. Ensuite la première direction du cheminement, *Qapiarfit-VI* a été rattachée à la direction connue *Qapiarfit-Manitsoq* par 8 couples à 5 pointés.

En cours de cheminement, on a imposé 7 azimuts astronomiques:

<i>U4</i>	—	<i>U3</i>
<i>U16</i>	—	<i>U15</i>
<i>U25</i>	—	<i>U24</i>
<i>U38</i>	—	<i>T37/5</i>
<i>U53</i>	—	<i>T52/6</i>
<i>TN65</i>	—	<i>TN64</i>
<i>T72</i>	—	<i>TN71</i>

Un autre azimut, *V7-V6*, n'a pas été imposé parce que sa détermination était suspecte (2 mesures, seulement, dispersant de 35") mais on a constaté qu'il est en accord satisfaisant avec la valeur géodésique.

3.3 Mesures de distances

Les distances ont été mesurées au telluromètre MRA 2. Chacun des trois weasels du Groupe de géodésie B était équipé à l'arrière d'un mât articulé destiné à supporter une parabole reliée par câble au telluromètre installé dans le véhicule. En fait cette procédure s'est révélée incommode et

en général, on fixait la parabole sur la balise qui constituait la station du cheminement. Très exceptionnellement, lorsque la parabole séparée était en panne, on a utilisé l'antenne fixée sur le poste, en centrant celui-ci sur la station.

Le mât articulé a néanmoins rendu de grands services. Il a servi de support à une échelle utilisée pour fixer la parabole sur la balise ou pour faire une reconnaissance aux jumelles. Il a aussi servi de support des thermomètres. Ceux-ci pendaient librement à un crochet; ils étaient protégés du rayonnement direct du soleil par une planchette et du rayonnement réfléchi sur la neige par un berceau enveloppant en contre-plaqué. On avait choisi sur le mât un point de fixation qui mettait les thermomètres à la hauteur moyenne de la visée au-dessus du sol.

Les pressions étaient lues sur des altimètres TOMMEN. Tous les soirs, du 1-7 au 21-8, les 3 TOMMEN étaient comparés à un WALLACE servant d'étalon. On a ainsi établi 3 courbes, qui sont d'ailleurs des droites; il apparaît que les 3 TOMMEN sont cohérents entre eux dans une marge d'une dizaine de mètres, et que leur écart avec le WALLACE, nul à 2000 m, atteint 50 mètres à 3200 m. Dans les calculs on utilise la pression qui aurait été lue sur le WALLACE, réputée juste.

La mesure elle-même des distances offrait beaucoup de souplesse du fait de l'universalité des postes, master ou remote au choix et de la compétence des participants; tous pouvaient jouer le rôle de remote et de master. Sans qu'une doctrine rigide ait été établie a priori, on improvisait selon les circonstances pour arriver à la meilleure efficacité. Exemple, les 3 véhicules se trouvant en place en A, B, C: mesure de A B, A étant master, puis mesure de B C, C étant master. Ceci prenait environ une heure et n'immobilisait en B que le secrétaire pour faire remote. Pendant ce temps l'opérateur mesurait l'angle en B, légèrement excentré et visant les 2 paraboles tournées vers lui.

La mesure d'une distance consistait en 16 groupes de 4 lectures (+, -, - reverse, + reverse) réparties sur la gamme de fréquences du poste. Ces 16 mesures étaient encadrées de mesures grossières sur les quartz B, C, D et de lecture aux 2 stations des thermomètres et des baromètres. Tout était noté par le master qui recevait les renseignements du remote. On notait aussi sur le même cahier les excentrement éventuels de chaque antenne.

Les mesures se sont généralement faites sans difficultés, avec des paraboles à 5 mètres du sol. Cependant dans la région centrale très plate il a fallu quelquefois monter à 7 mètres. Les batteries étaient celles du weasel, et n'ont créé aucun problème. Le poste était accroché à une paroi du weasel, face à un opérateur assis. En dehors des mesures, il était logé dans un sac en mousse. La parabole avait un logement sur le toit du weasel, pour les transports.

3.4 Réduction des mesures tellurométriques

Les éléments de réduction sont les suivants:

- Températures: moyenne arithmétique des mesures faites en chaque station avant et après la mesure.
- Pressions: pour chaque station, moyenne des lectures avant et après la mesure, corrigée pour obtenir la valeur qu'aurait donné le WALLACE.
- Altitudes: Altitude sol ou pied-balise fournie par le nivellement de 1968 (plus hauteur de la parabole notée lors des observations) ou nivellement de 1959 pour les points non nivelés en 1968.
- Double-temps de parcours: lu sur le telluromètre.
- Constante des appareils et excentremments.

Un programme en FORTRAN écrit pour la circonstance calcule à partir de ces éléments les distances réduites à l'ellipsoïde, sur l'IBM 1130 de l'*Institut Géographique National*. Les réductions météorologiques se font par la formule d'Essen et Froome:

$$(n - 1) \times 10^6 = \frac{103,49}{T} (p - p') + \frac{86,26}{T} \left(1 + \frac{5748}{T}\right) p' \quad (3)$$

où T est la température sèche absolue.

p est la pression.

p' est la pression de vapeur d'eau.

On obtient la pression p en mm Hg à partir des altitudes en kilomètres par une formule définie par le règlement Air 0600:

$$p = 760 \times (1 - 0,022557 \times \text{altitude})^{5,256601} \quad (4)$$

On obtient p' à partir de la pression saturante PS par la formule de Sprung:

$$p' = PS - \frac{0,43 \times (t \text{ sèche} - t \text{ humide}) \times p}{755} \quad (5)$$

Auparavant, PS se calcule par la formule:

$$\text{Log}_{10} \frac{PS}{760} = 17,443 - \frac{2795}{T'} - 1,680 \text{ Log}_e T' \quad (6)$$

T' étant la température humide absolue.

Les autres réductions: pente, altitude, sphéricité n'appellent pas de commentaires.

3.5 Cas particulier de la distance V3-V5

Dans la région côtière Ouest, la reconnaissance était difficile, par la nature du terrain, l'absence de tout repère, et l'obligation d'utiliser parcimonieusement les hélicoptères. Il est arrivé que le point *V4* se révèle mal choisi et doive être remplacé par un point éloigné d'environ 1 km, qu'on a appelé *V5*. La distance *V3-V4* avait été mesurée au telluromètre, mais on n'a pas mesuré *V3-V5*. On a alors mesuré au telluromètre *V4-V5*, et au théodolite les 3 angles du triangle *V3-V4-V5*. Les 2 distances *V3-V4* et *V4-V5* ont été réduites comme toutes les autres et on a déduit la distance *V3-V5*, la seule effectivement introduite dans le cheminement, par résolution du triangle *V3-V4-V5*.

3.6 Mesures d'angles

Sauf 5 exceptions (*U27*, *U38A*, *U48A*, *U65*, *TN67*) où on a utilisé un KERN DKM3 ou un WILD T2, tous les angles ont été mesurés au WILD T3. Le groupe disposait de 2 T3, ce qui permettait de faire deux mesures en un espace de temps réduit lorsqu'on voulait exploiter à fond une très bonne visibilité, l'équipe dépourvue de T3 utilisait un des appareils cités plus haut. La journée record a été le 23 juillet où on a mesuré 4 angles et 5 distances.

Le théodolite était monté sur un tripode RAGUET. Généralement, lorsqu'un souci de rapidité n'imposait pas de faire la mesure d'angle en même temps que celle de la distance, on démontait les éléments de la balise qui servait de point géodésique et on centrait l'appareil sur le tube émergeant du sol. Lorsque la balise était inclinée, on marquait l'aplomb au sol du point choisi (haut du même élément), par visée au théodolite ou fil à plomb et on centrait le théodolite sur ce point. La balise n'était alors démontée que si elle empêchait l'installation du théodolite.

Les mesures consistaient en 4 couples à 5 pointés sans fermeture avec changements d'origine et retournement de lunette. Les moyennes étaient calculées immédiatement et si la dispersion était hors des tolérances on reprenait un ou deux couples.

Les points visés étaient les paraboles des telluromètres. Rondes et peintes en noir mat elles constituaient d'excellentes mires. Dans des cas difficiles, *Qapiarfit* vers *V1* ou *T71* vers *Cecilia*, on a visé des projecteurs. Lorsque la visibilité permettait de viser des balises nues, on en profitait soit pour libérer une équipe sitôt la mesure au telluromètre finie, soit en fin de journée pour faire la visée sur le point avant que l'on n'atteindrait que le lendemain.

En une quinzaine de stations, dont la plupart dans la zone plate qui va de *Centrale* à *Jarl-Joset*, les visées ne seraient pas passées du sol,

il a fallu construire une station élevée. On enfonçait, de part et d'autre du weasel, dans des trous faits à la tarière, 2 madriers. La neige était vigoureusement tassée dans les trous, assurant une bonne fixité. Sur les 2 madriers verticaux un troisième était simplement posé, horizontalement, formant un pont à un mètre au-dessus du toit du weasel. Le théodolite était vissé sur un socle lourd posé sur le pont. Cette installation rustique a permis d'excellentes mesures. Par son poids, elle était indifférente à des vents sauf très forts; par son matériau, elle ne tournait pas au soleil. La cohérence des pointés et des séries montre que les mesures valaient celles faites au sol. Mais l'inconfort pour l'opérateur était remarquable. Dans les carnets d'observations, ces stations sont dites «sur pont».

3.7 Réduction des mesures angulaires

Chaque fois que possible, le théodolite et les paraboles qu'il visait étaient tous les 3 centrés sur le point choisi comme station du cheminement. Les mesures ne nécessitaient alors aucune réduction au centre.

Lorsque le théodolite était excentré, il a fallu calculer des corrections de station (CS sur les imprimés). Lorsque les points visés étaient excentrés, on a calculé des corrections de visée (CV). Ces corrections ont toutes été calculées 2 fois: graphiquement et trigonométriquement: le signe a été déterminé par le graphique seul.

3.8 Mesures de rattachement

Parmi les 61 balises de 1959 retrouvées, 17 ont été choisies comme stations du cheminement. Les 44 autres ont été rattachées. Les mesures d'angles nécessaires étaient faites au cours du tour d'horizon. 21 distances comprises entre 600 et 5600 m ont été mesurées au telluromètre et réduites comme les distances du cheminement. Les autres distances de rattachement étaient de l'ordre de 2 ou 3 mètres et mesurées au double-mètre. Exception: une centaine de mètres à *T31*, mesurés au double-décamètre.

3.9 Calcul du cheminement

On a utilisé un programme en usage à l'*IGN* pour IBM 1130, avec une légère variante qui fournit les résultats sur des cartes perforées utilisées ensuite pour calculer les rattachements.

Le cheminement est divisé en 7 segments, limités par des points où l'on a mesuré astronomiquement l'azimut de la visée vers le point précédent. Chaque segment est calculé indépendamment.

Les données du calcul sont :

- au 1er point: coordonnées et azimut du côté précédent,
- en chaque point: angle mesuré et, sauf le dernier, distance au point suivant,
- au dernier point: azimut astronomique du point précédent, longitude utilisée dans le calcul de l'azimut.

La liste obtenue rappelle ces données, dans la partie gauche, et donne dans la partie droite les résultats: longitude Greenwich, latitude, azimut vers l'arrière, azimut vers l'avant. Tout est dans le système centésimal.

Le programme calcule d'abord à partir des données un enchaînement qui aboutit aux coordonnées du dernier point. La longitude trouvée, rapprochée de celle utilisée pour l'azimut, permet de calculer la correction de Laplace (différence de longitude \times sinus de la latitude) qui est appliquée à l'azimut astronomique. La différence entre l'azimut issu de l'enchaînement et l'azimut astronomique corrigé est l'erreur de fermeture du segment; elle est imprimée. Cette erreur de fermeture est répartie linéairement sur les angles. Avec ces angles corrigés, on calcule un deuxième enchaînement, qui est le définitif. Signalons qu'on a empêché le programme de modifier l'angle en *Qapiarfit*, qui peut être considéré comme sans erreur.

3.10 Calculs de rattachement, reconstitution d'angles et distances

A partir des sommets du cheminement, on a calculé les coordonnées des pieds des balises de 1959. Ceci a été fait par un unique programme FORTRAN, qui travaillait en 2 phases:

- Calcul des coordonnées du détail rattaché (exemple haut du 6ème élément d'une balise) par rayonnement, les données étant:
 - coordonnées du point de départ
 - azimut du côté géodésique arrière
 - angle avec ce côté de la direction du point rattaché
 - distance réduite à l'ellipsoïde.
- Passage du détail rattaché au pied de la balise par exploitation des mesures d'inclinaison faites par la *Géodésie A*.

Des coordonnées des pieds de balises ainsi trouvées, un autre programme a déduit des éléments utiles pour des comparaisons avec 1959:

- Distances entre points.
- Azimuts avant et arrière de chaque côté.
- Angles entre côtés consécutifs.

Un tableau des coordonnées et des éléments qui en sont déduits est archivé dans le dossier «GROENLAND 1967» à l'*Institut Géographique National, 2 avenue Pasteur, (94) Saint-Mande, France.*

3.11 Précision des mesures de distances

L'étude des formules utilisées pour les corrections météorologiques montre les effets d'erreurs sur les différents paramètres. Il faut une erreur de 2,5 mm/Hg sur la pression atmosphérique, soit environ 35 mètres si on utilise un altimètre pour que l'incidence soit de 10^{-6} sur la distance. Les comparaisons journalières des TOMMEN avec un WALLACE bien étalonné nous garantissent d'être en deçà de cette erreur.

Un degré d'erreur sur la température sèche entraîne 10^{-6} sur la distance. On peut espérer être resté dans cette limite du fait des précautions prises: thermomètres placés à la hauteur moyenne de la visée, à l'air libre et protégés des rayonnements; et aussi du fait de l'homogénéité de l'atmosphère au long de la visée, qui se traduit par le faible écart des températures aux deux extrémités. Cependant, à cause du fort gradient de température au voisinage du sol, peut-être la température moyenne intégrée sur le parcours de la visée diffère-t-elle de celle lue aux extrémités. Il y aurait alors une erreur systématique de 10^{-6} , soit pour l'ensemble du cheminement moins d'un mètre, par degré d'erreur.

Un paramètre très influent est la pression de vapeur d'eau, qui se traduit par une erreur de $7,4 \times 10^{-6}$ sur la distance par mm/Hg. Aux environs de -8° , qui est la température moyenne du cheminement, la pression saturante varie d'à peu près 0,2 mm/Hg par degré, ce qui entraîne $1,5 \times 10^{-6}$ sur la distance par degré d'erreur sur la température humide. D'autre part, la pression de vapeur d'eau est déduite de la pression saturante par soustraction d'un terme qui vaut environ $0,3 \times \Delta t$, Δt étant la différence des températures sèche et humide. D'où une erreur sur la distance de $2,2 \times 10^{-6}$ par degré d'erreur sur la différence des températures.

Pour résumer les erreurs à craindre du fait de la météorologie: moins d'un millionième du fait de la pression, peut-être un ou deux millionièmes du fait de la température sèche, jusqu'à 3 millionièmes du fait de la température humide. En tout un maximum vraisemblable de 5×10^{-6} , soit quelque chose de parfaitement négligeable si accidentel; si les erreurs sont systématiques, l'incidence sur quelque 900 kms est inférieure à 5 mètres, et disparaîtra comme toute erreur systématique par une compensation linéaire des mesures pour fermer sur des coordonnées convenues de *Cecilia Nunatak*.

Citons pour mémoire les corrections géométriques (pente, altitude)

qui n'introduisent aucune erreur puisque les données utilisées viennent d'un nivellement de précision.

Les erreurs sur les lectures au telluromètre du temps de propagation pourraient être chiffrées très précisément en étudiant systématiquement, pour chaque distance, les écarts à la moyenne de chacune des 16 mesures. On ne l'a fait que pour quelques distances, d'où il ressort que l'erreur moyenne est de l'ordre de 1,5 unité, soit 22 cm pour une mauvaise mesure et 0,7 unité, soit 10 cm pour une bonne. Convenons d'une erreur de lecture moyenne d'une unité, soit 15 cm. Purement accidentelle son effet sur l'ensemble du cheminement est $0,15 \times \sqrt{95} \sim 1,5$ mètre.

L'instabilité possible de la fréquence des quartz ne doit pas excéder, selon les résultats des nombreux contrôles effectués à l'IGN au retour des missions, 10 périodes sur 10 millions, soit une erreur de 10^{-6} ou encore 1 mètre sur le cheminement si cet écart de 10 périodes est resté systématique. Enfin l'incertitude sur la constante d'étalonnage des appareils, par le soin pris à sa mesure, ne devrait pas dépasser 2 cm, ce qui pour 95 portées ferait moins de 2 mètres.

Au total on peut raisonnablement avancer comme limites des erreurs sur les mesures tellurométriques les valeurs suivantes :

- une erreur accidentelle de lecture de 15 cm par portée, soit 1,5 mètre pour le cheminement,
- des erreurs systématiques
 - de 5×10^{-6} pour la météorologie, soit 5 mètres,
 - de 1×10^{-6} pour les quartz soit 1 mètre,
 - de 2 cm par portée pour l'étalonnage soit 2 mètres.

Dans le cas le plus défavorable d'accumulation des erreurs systématiques, leur effet sur la longueur totale serait de 8 mètres, et de toute façon disparaîtra totalement par une compensation linéaire.

3.12 Précision de mesures angulaires

Les angles étaient mesurés par 4 couples, sans fermeture, à 5 pointés, avec 4 origines également réparties sur le cercle, deux retournements de lunette et changement de sens de rotation. Les mires étaient le plus souvent les paraboles noires des telluromètres, qui s'encadraient très bien dans la paire de fils verticaux du réticule. On ne s'avance donc pas trop, dans ces conditions, en escomptant une précision de l'ordre de 3" sur la mesure de chaque angle.

Les mesures des distances de rattachement étaient faites à mieux qu'un centimètre, et les mesures angulaires de rattachement étaient aussi poussées jusqu'à donner mieux qu'un centimètre. Sur une distance moyenne de 10 kms, il peut en résulter environ 1/2 seconde par ratta-

chement et par direction; soit, dans le pire cas où il y aurait rattachement de la station et des 2 points visés, 1" pour la station, 1/2" pour chaque point visé, en tout et quadratiquement $\sqrt{(1)^2 + (\frac{1}{2})^2 + (\frac{1}{2})^2} = 1", 2$.

La combinaison quadratique des 3" sur la mesure proprement dite et d'une seconde environ sur les rattachements ne donne finalement guère plus de 3". L'erreur dans la transmission de l'orientation, au terme d'un segment de n portées, est donc de 3" \sqrt{n} soit:

9" pour le segment	<i>Qapiarfit</i> –	<i>U4</i>
12" pour le segment	<i>U4</i>	– <i>U16</i>
9" pour le segment	<i>U16</i>	– <i>U25</i>
11" pour le segment	<i>U25</i>	– <i>U38</i>
14" pour le segment	<i>U38</i>	– <i>U53</i>
12" pour le segment	<i>U53</i>	– <i>TN65</i>
9" pour le segment	<i>TN65</i>	– <i>Cecilia</i>

3.13 Mouvements de surface du glacier : effet sur les angles

Les mouvements de la surface du glacier compliquent la tâche du géodésien en introduisant dans les mesures des erreurs qui n'ont pas le caractère accidentel, et qu'on ne peut cependant pas corriger a priori parce qu'on ne connaît pas la loi qui les régit. On peut cependant essayer de les évaluer.

Après un premier calcul du cheminement qui ignorait totalement ces mouvements, on a obtenu les angles et distances en 1967 entre les balises T de 1959. La comparaison avec les valeurs de 1959 donne quelques indications intéressantes.

L'angle en *T1* doit être négligé, car un côté trop court vers *T0*, moins d'un kilomètre, le rend trop sensible. L'angle en *T2* a augmenté de 46" en 8 ans, soit environ 1",5 par jour. L'angle en *T3* n'a pratiquement pas varié. Les 13 angles suivants, de *T4* à *T15* inclus, correspondent au segment de cheminement *U4–U16*. La plus forte variation est de 22" en *T11A*, pour 8 ans, soit 0",7 par jour. En outre elles sont de signe variable. Ce segment a été mesuré en 9 jours. Prétendre corriger les angles des effets du mouvement du sol, pour les ramener à ce qu'ils auraient été à une date unique moyenne, aboutirait donc à des corrections de signe aléatoire et comprises entre 0 et 2", ce qui est dépourvu de toute signification. Il va de soi qu'au delà de *T15*, à mesure qu'on arrive en région stable, ces corrections sont encore plus négligeables. Dans les régions extrêmes, Ouest et Est, où elles auraient pu avoir quelque ampleur, on n'a pas d'élément de calcul puisque les points de 1959 n'ont pas été retrouvés en 1967.

Ces variations angulaires dont nous avons montré l'inanité sont la

partie linéaire, proportionnelle au temps. Sans doute les mouvements du glacier ajoutent-ils à cela une composante à courte période, ou même des discontinuités en cas de secousse. Mais il s'agit là de variations accidentelles, que l'on ne peut évaluer. On en constatera les effets par comparaison avec les azimuts astronomiques, et on les corrigera en imposant ces azimuts.

3.14 Mouvements du glacier : effet sur les distances

Comme il a été dit pour les angles, les variations de distances sous l'effet des mouvements de surface comprennent une partie proportionnelle au temps, faible, et une autre accidentelle sur laquelle on ne peut intervenir.

L'étude qui suit traite uniquement de la composante systématique proportionnelle au temps. Elle porte sur le parcours *T0-T54*. Avant *T0* et après *T54* les balises 1959 ont disparu, sauf des isolées jusqu'à *T62*, et il n'y a donc pas de comparaison possible. On a évalué, pour chaque portée, la variation de longueur entre le 6 juillet 1967, zéro heure et le moment où elle a été mesurée, en se basant sur la variation en 8 ans. En supposant que les coordonnées de *T0* sont bien celles du 6 juillet 1967, on a cumulé les erreurs sur la distance à *T0* de chaque point, dues à ce que les mesures sont étalées du 27 juin au 30 juillet. Les résultats sont résumés dans le tableau N°5.

Sur ce tableau on voit que l'écart croît jusqu'à 1,30 mètres, vers *Milcent*, pour décroître ensuite jusqu'à zéro vers *Jarl-Joset*. Nous pensons que de tels écarts ne justifient pas une correction a priori. Quant à *T0*, les coordonnées trouvées sont le résultat de mesures faites entre le 14 juin et le 26 juin, disons en moyenne le 20 juin, soit 16 jours avant la date de référence choisie. En 8 ans, *T0* s'est déplacé de 400 mètres vers le Sud et 960 mètres vers l'Ouest, soit en 16 jours 2 mètres vers le Sud, et 5 mètres vers l'Ouest. Il faudrait, après avoir calculé le 1er tronçon *Qapiarfit-U4*, modifier des quantités annoncées les coordonnées de *T0* et des points suivants. On obtient le même résultat plus élégamment en faussant de 2 et 5 mètres les coordonnées de *Qapiarfit*. Ainsi l'ensemble du cheminement est translaté de la quantité nécessaire pour réduire les mesures de distance à ce qu'elles auraient été le 6 juillet 1967, zéro heure. Ceci du moins est vrai jusqu'à *T54*. Au-delà, la disparition de la plupart des balises 1959 n'autorise pas d'hypothèses précises sur les mouvements du glacier. Cependant, on peut étudier le comportement du dernier point retrouvé: *T62*. Entre 1959 et 1967, son mouvement serait de 220 mètres vers le Nord. Mais une suspicion plane à bon droit sur l'orientation du cheminement de 1959, puisque l'on constate que *Cecilia*, réputé fixe, aurait aussi bougé de quelque 300 mètres vers le Nord. Ce que nous

retiendrons en tout état de cause, c'est que les déplacements de *T62* dans le sens Ouest-Est, c'est-à-dire dans le sens d'une variation des distances, ne sont pas manifestes. Quand bien même ils atteindraient quelques dizaines de mètres en 8 ans, cela ne ferait que quelques décimètres en un mois, donc quelque chose de négligeable.

En conclusion, une altération voulue des coordonnées de départ donne comme résultat de calcul les coordonnées qu'on aurait obtenu en exécutant toutes les mesures à un instant donné, le 6 juillet 1967 à zéro heure. Ceci dans la limite d'une erreur de 1,3 mètres dans la région de *Milcent*.

3.15 Justification des azimuts astronomiques

Outre les erreurs chiffrables dans les mesures angulaires, on a déjà mentionné celles dues aux mouvements du glacier qui ne peuvent être appréciées mais n'en existent pas moins. Elles sont mises en évidence par les azimuts astronomiques.

Sur le tronçon *Qapiarfit-U4*, entre la géodésie à 9" près et l'astronomie à 19" près le désaccord est de 63". De toute évidence les mouvements du sol inchiffrables ont là perturbé la géodésie d'au moins une quarantaine de secondes. Dans ce cas, aussi imprécis soit-il, l'azimut astronomique est encore ce qu'il y a de mieux connu et il faut l'imposer au cheminement. Le phénomène est confirmé par le tronçon suivant : écart plus faible, mais encore supérieur aux discordances à attendre entre géodésie et astronomie et de même sens que pour le 1er tronçon.

Sur un tronçon comme *U25-U38*, en région plus stable, entre une géodésie estimée bonne à 11" et une astronomie incertaine de 15" au départ et 12" à l'arrivée, le désaccord n'est que de 3". Dans un tel cas, les mouvements du sol, s'il y en a eu, n'ont pas d'effet perceptible.

En conclusion, pour les deux premiers segments du cheminement, où l'effet des mouvements du glacier est à la fois prouvé et non corrigible, il faut absolument s'en remettre aux azimuts astronomiques. Au-delà, l'effet des mouvements du sol reste dans la limite de la précision de la géodésie et de l'astronomie; rien n'autorise cependant à affirmer qu'il soit nul et on ne prend aucun risque en imposant aussi l'azimut astronomique.

3.16 Précision de chaque segment

Considérons un segment de cheminement A-B, d'une longueur de n kilomètres, de n portées. L'orientation adoptée pour ce segment est la moyenne d'un azimut de départ à e_1 " près et d'un azimut d'arrivée à e_2 " près. Cette orientation est donc incertaine de

$$e'' = \frac{\sqrt{e_1^2 + e_2^2}}{2} \quad (7)$$

Il en résulte sur l'extrémité B une incertitude en position :

$$i = \frac{1 \times e}{640} \text{ mètres} \quad (8)$$

perpendiculairement à la direction A-B. Cette incertitude peut se décomposer en i_1 en longitude et i_2 en latitude.

On a vu au 3.11 que l'erreur accidentelle en distance était de 15 cm par portée. Comme les segments, sauf le 1er, sont tendus, on peut dire que les erreurs sur chaque portée aboutissent à une erreur globale dans la direction A-B. Cette erreur est :

$$j = 0,15 \sqrt{n} \quad (9)$$

Elle se décompose en j_1 en longitude et j_2 en latitude. i et j se combinent quadratiquement pour donner :

$$\text{incertitude en longitude} = \sqrt{i_1^2 + j_1^2}$$

$$\text{incertitude en latitude} = \sqrt{i_2^2 + j_2^2}$$

Le tableau N° 6 résume les valeurs trouvées pour les différents segments.

3.17 Précision globale du cheminement

On a déterminé dans le paragraphe précédent les erreurs en longitude et latitude sur les extrémités de chaque segment, en supposant que le point de départ était parfait. Nous obtiendrons maintenant les erreurs globales en cumulant ces résultats quadratiquement. C'est-à-dire que si au terme du tronçon n on a des erreurs en longitude et latitude e_n et e'_n , et que le tronçon $(n+1)$ entraîne des erreurs ε et ε' , les erreurs au terme du $(n+1)^{\text{ème}}$ tronçon seront :

$$e_{n+1} = \sqrt{e_n^2 + \varepsilon^2} \quad (10)$$

$$e'_{n+1} = \sqrt{e'_n{}^2 + \varepsilon'^2} \quad (11)$$

Le tableau N° 7 résume les résultats obtenus. Ce qui précède fait le point des erreurs accidentelles.

Il faut ajouter, pour estimer notamment l'incertitude sur le terminus *Cecilia*, l'effet des systématismes possibles en distance (cf. 3.11) et

orientation (cf. 2.9). On a dit qu'une limite raisonnable de l'erreur systématique en distance est de 8 mètres dans le sens du cheminement, soit 7 mètres en longitude et 4 mètres en latitude. On a dit aussi que l'erreur systématique en orientation serait de 4" par 1/10 seconde d'équation personnelle; disons 8" pour 2/10 sec, soit au terme du parcours environ 10 mètres perpendiculairement à la direction moyenne, soit encore 5 mètres en longitude, 9 mètres en latitude. En tout, dans le pire des cas, l'effet total des systématismes et des erreurs accidentelles, serait, à *Cecilia*: 16 mètres en longitude, 20 mètres en latitude.

3.18 Conditions d'une exploitation des résultats

La connaissance des coordonnées réelles de *Cecilia* permettra seule d'apprécier la valeur du travail effectué. Si l'écart de fermeture se trouve dans les limites annoncées, tout est pour le mieux. Si l'écart est supérieur mais du même ordre, c'est qu'on a sous-estimé toutes les sources d'erreur. S'il est très nettement supérieur, cela mettrait en évidence une faute, et non plus une erreur. Hormis ce cas, une compensation linéaire donnera pour chaque point intermédiaire des coordonnées satisfaisantes.

Mais heureusement le travail effectué n'a pas pour but la détermination *absolue* des coordonnées des balises de 6 juillet 1967, mais la détermination de positions *comparables* à celles de 1959. Ceci veut dire que, même si l'on ne connaît pas la vraie position de *Cecilia*, pourvu que les 2 travaux à comparer aboutissent à des positions qui diffèrent dans la limite des erreurs analysées, on peut convenir d'une valeur à attribuer d'un commun accord à *Cecilia*.

On compensera chaque cheminement en lui imposant de fermer sur les coordonnées convenues. Et ainsi, pour un point quelconque, alors que ni sa position 1959 ni sa position 1967 ne seront rigoureusement exactes, son déplacement sera parfaitement mesuré.

Au moment où ce rapport est écrit, les résultats de 1959 et 1967 divergent de quantités tellement supérieures aux erreurs évaluées qu'une telle compensation n'est pas envisageable.

3.19 Collaboration du Groupe de géodésie A

De plusieurs manières, le *Groupe de géodésie A* a fourni à son homologue français des renseignements. Nous lui en exprimons ici notre reconnaissance.

Les mesures d'inclinaison des balises de 1959 ont toutes été faites par le *groupe A*, nous n'avons fait qu'utiliser leurs résultats pour obtenir les coordonnées des pieds des balises.

La comparaison des mesures et résultats des deux groupes a été fructueuse en trois occasions. L'azimut astronomique en *U16* avait fait apparaître une faute de l'ordre d'un grade, localisable en *U9A*. La comparaison avec le groupe A a permis d'établir sans doute possible une faute d'identification de balise (on avait visé *U8A* au lieu de *U9*) et de la corriger. Une incertitude de 10' en *TN66* a été levée aussi sans doute possible par comparaison avec la *Géodésie A*. Enfin une faute dans un calcul d'excentrement dans le segment *U38-U53* a été mise en évidence par comparaison de résultats à *Karlsruhe* en 1969.

3.20 Documentation

Les données et résultats du calcul du cheminement et des distances et angles entre pieds de balise 1959, reconstitués par calcul à partir des coordonnées, pour faciliter des rapprochements avec les résultats de 1959, sont archivés à l'*Institut Géographique National*, 2 avenue Pasteur, (94) Saint-Mande, France, dans le dossier «GROENLAND 1967» où se trouvent en outre:

- Les cahiers originaux d'observations angulaires, en 39 feuillets de 4 pages, numérotés de 1 à 39.
- Un résumé des mesures angulaires, avec calcul des excentremments, en 27 cahiers de 4 pages numérotés de 1 à 27.
- Des mesures graphiques des excentremments angulaires, en 8 cahiers de 4 pages, numérotés de 28 à 35.
- Les 6 cahiers originaux de mesures de distance au telluromètre.
- Les comparaisons de baromètres au WALLACE: 3 feuilles de mesure et 4 pages de graphique.
- Les résumés des observations tellurométriques:
 - par station, 14 pages; par portée, 5 pages.
- Un listing des 4 programmes FORTRAN utilisés:
 - Réduction des mesures tellurométriques.
 - Calcul du cheminement.
 - Calcul des rattachements.
 - Calcul des distances et angles entre points connus.
- Les calculs particuliers faits par le Service de la géodésie:
 - *V0* en *Qapiarfut*,
 - résolution du triangle *V3-V4-V5* pour avoir la distance *V3-V5*,
 - résolution du triangle *U8A, U9, U9A* pour corriger la faute d'identification de balise en *U9A*.

4. PENTAGONES

Le programme du *Groupe de géodésie B* comportait la création et la mesure de 3 pentagones, en début de campagne, et une deuxième mesure, en fin de campagne, de 3 autres pentagones créés et mesurés par la *Géodésie A*.

Les 3 pentagones implantés ont leurs centres près de *T31 (Centrale)*, *T15 (Milcent)* et *T4 (Carrefour)*. On les a faits aussi réguliers que le permettait le terrain, avec un rayon de 7 kilomètres pour les deux premiers, et 6 kilomètres à *Carrefour*. On a fait en sorte qu'un rayon soit voisin du cheminement géodésique.

Pour implanter les sommets, on orientait le compas solaire d'un weasel, au départ du centre, pour lui faire suivre la direction voulue. Après avoir fait 7 kilomètres au compteur, le weasel s'arrêtait et on installait la parabole du telluromètre. Une mesure grossière indiquait de combien corriger la distance et une mesure d'angle faite au centre était traduite en écart vers la droite ou la gauche.

Pour chacun des six pentagones, on a mesuré les longueurs des 5 rayons (plus un côté à *Jarl-Joset*), et 5 à 11 angles indépendants.

4.1 Mesures de distances et angles

Les distances ont été mesurées au telluromètre. On trouvera dans le chapitre 3: «Cheminement Géodésique» tous les détails sur la technique des observations, les calculs de réductions, la précision escomptée. Notons simplement qu'à la différence de la géodésie, et en l'absence de nivellement de précision sur les sommets du pentagone, on a adopté les altitudes barométriques pour les corrections de pente et d'altitude. L'incertitude qui en résulte sur les corrections de pente est certainement minime, puisque cette correction varie peu au voisinage de zéro. L'effet sur la réduction au niveau zéro est nul, car on a décidé de réduire les mesures au plan horizontal passant par le centre.

Les angles ont été mesurés par couples à 5 pointés, au théodolite WILD T3, tout comme ceux du cheminement géodésique.

4.2 Calculs, résultats, précision

On a d'abord corrigé les mesures angulaires des éventuels excentrements, à la fois par calcul trigonométrique et graphiquement. On a réduit les mesures tellurométriques par le programme ad hoc, puis on a retranché de la distance réduite la correction de niveau zéro, de façon à ce que

les longueurs soient celles du plan horizontal passant par le centre du pentagone et à l'altitude de ce centre.

Les données ainsi épurées ont été transmises au service de la géodésie de l'*Institut Géographique National*, qui a fait le calcul sur son ordinateur IBM 1130 avec le programme standard de compensation de triangulation. Les résultats obtenus sont les coordonnées des 5 sommets dans le système suivant:

- plan horizontal défini plus haut,
- coordonnées $X = 10.000,00$ $Y = 10.000,00$ pour le centre,
- droite centre – sommet 1 comme axe des y .

Les données et les résultats sont résumés dans un tableau par pentagone, dans le dossier »GROENLAND 1967» N° 2.

Le programme de compensation met en évidence la précision du travail, exprimée par l'erreur moyenne quadratique sur les directions, en 10^{-5} radian. Les erreurs sont:

<i>Carrefour</i>	$1,4 \cdot 10^{-5}$
<i>Milcent</i>	$0,2 \cdot 10^{-5}$
<i>Centrale</i>	$1,5 \cdot 10^{-5}$
<i>Crête</i>	$1,0 \cdot 10^{-5}$
<i>Jarl-Joset</i>	$1,7 \cdot 10^{-5}$
<i>Dépôt 420</i>	$1,2 \cdot 10^{-5}$

On voit que la précision est celle qui avait été requise, de l'ordre de 10^{-5} .

4.3 Matérialisation des points

On ne parle ici que des 3 pentagones implantés par la *Géodésie B*: *Carrefour*, *Milcent*, *Centrale*.

Les centres et les sommets sont matérialisés par des balises de 3 éléments. On a gravé sur ces balises *R0* pour les centres, et *R1* à *R5* pour les sommets, en tournant dans le sens des gisements. Les centres de *Carrefour* et *Centrale* constituent les sommets *U4* et *U31* du cheminement géodésique et portent aussi ces noms.

Si les balises *R0* avaient disparu lorsqu'on voudra remesurer les pentagones, on pourrait utiliser les balises *T4*, *T15*, *T31*. Leurs coordonnées dans le système de chaque pentagone sont les suivantes:

<i>T 4/7</i>	$X = 10.000,33$	$Y = 10.000,37$
<i>T15/7</i>	$X = 9.999,96$	$Y = 9.999,14$
<i>T31/7</i>	$X = 9.898,96$	$Y = 10.029,99$

(Les calculs sont présentés en page 9, 10 et 14 du cahier d'observations).

La balise *R3* du pentagone de *Carrefour* est à environ 500 mètres au Sud de la ligne *T3-T4*. La balise *R1* du pentagone de *Milcent* constitue le point *U14* du cheminement géodésique; elle est à 602 mètres de *T14*, dans l'azimut 68 grades. La balise *R1* du pentagone de *Centrale* est à une centaine de mètres au Nord de la ligne *T29-T30*.

4.4 Documentation

Dans les archives de *l'Institut Géographique National*, 2 avenue Pasteur, (94) Saint-Mande, France, dans le dossier «GROENLAND 1967», on trouvera:

- Les données des pentagones de *Carrefour*, *Milcent*, *Station Centrale*, *Crête*, *Jarl-Joset* et *Depot 420*.
- 6 cahiers contenant les originaux des mesures d'angle, les réductions au centre graphiques et calculées: 10 feuilles pour *Carrefour*, 10 pour *Milcent*, 14 pour *Centrale*, 8 pour *Crête*, 10 pour *Jarl-Joset*, 6 pour *Dépôt 420*.
- 3 cahiers contenant les mesures tellurométriques originales.
- Un résumé des mesures tellurométriques:
 - par station: 6 feuilles
 - par portée: 5 feuilles
- Le listing des réductions tellurométriques.
- Le tableau des données fournies au service de calcul (6 feuilles).
- Les fiches de données établies pour l'ordinateur (19 feuilles).
- Les résultats: 5 pages de listing par pentagone.

5. ACTIVITÉS DIVERSES

Outre le cheminement géodésique et les pentagones, le *Groupe de géodésie B* a eu diverses activités qui seront décrites dans ce chapitre.

5.1 Navigation

En début de campagne, le groupe a assuré la navigation de *Dye II* à *Inter II* pour l'ensemble du convoi, puis jusqu'à *Station Centrale* pour lui seul. La mise en direction du weasel pilote se faisait au départ par observations à l'astrocompas fixé sur le toit. La conservation du cap était assuré en route par le dispositif à pinnules des *Expéditions Polaires Françaises*, fixé à l'avant du véhicule. En fait le dispositif tourne selon une horloge, alors que la variation d'azimut du soleil n'est pas une

fonction linéaire du temps. En se fiant absolument au conservateur de cap on s'écarte donc de la route vers la droite ou la gauche selon l'heure. Ces déviations avaient été évaluées et mises en table. On les prévenait en faussant volontairement, au départ, le cap de façon qu'au bout de 2 heures on recoupe le trajet idéal.

On refaisait alors une nouvelle mise en direction à l'astrocompas, elle aussi volontairement faussée, etc. . . . Nous avons baptisé ce procédé «marche en croissants».

L'exactitude de la navigation était de temps en temps contrôlée sommairement par une droite de hauteur expédiée sur le soleil, lorsque celui-ci était dans une direction à peu près perpendiculaire au parcours, de façon à donner un lieu géométrique parallèle au parcours. On a fait deux contrôles plus précis aux points *Inter I* et *Inter II*.

La route choisie était un compromis entre l'orthodromie, économique mais obligeant à des calculs de caps fréquents, et la loxodromie, route facile à cap constant mais plus longue. En fait sur l'orthodromie *Dye II - Crête*, on avait choisi 2 points intermédiaires qui deviendront les dépôts *Inter I* et *Inter II*, et on a navigué à cap constant sur chacun des 3 segments ainsi délimités.

La navigation s'est révélée finalement bonne. En effet sans la correction finale faite à vue quand on a découvert *Station Centrale* aux jumelles, nous serions passés à 4 kilomètres seulement du but après 600 kilomètres de parcours.

5.2 Détermination de INTER I et INTER II

Au cours de la marche de *Dye II* vers *Crête* et *Centrale*, deux dépôts d'essence ont été constitués pour la campagne de 1968. On les a baptisés *Inter I* et *Inter II*. Le *Groupe de géodésie B* en a déterminé les coordonnées par observation de hauteurs du soleil. Les coordonnées obtenues sont, en système sexagésimal:

	<i>Inter I</i>	<i>Inter II</i>
Longitude	-43°35'39"	-40°43'02"
Latitude	68°00'24"	69°40'48"

Au vu des graphiques, la précision semble être de l'ordre de 300 mètres. De toutes façons, ces déterminations ont atteint leur but puisque les dépôts ont bien été retrouvés en 1968.

5.3 Carré de Milcent

EGIG I avait implanté en 1959 quelques carrés de déformation. Le *Groupe de géodésie B* a remesuré celui de *Milcent* les 29 et 30 mai 1967.

Les observations se rapportent toutes aux sommets du 7ème élément de chaque balise. On a mesuré au telluromètre les 4 rayons, et au théodolite les 4 angles au centre et les 4 angles droits aux sommets. Les distances tellurométriques ont été réduites par le programme déjà cité. Pour la correction de pente, on a adopté les dénivelées mesurées en 1959. Pour ne pas faire de réduction au niveau zéro, on a pris l'altitude zéro pour le centre. Ainsi les mesures sont réduites au plan horizontal passant par *T15*, à l'altitude de *T15*.

La compensation a été faite par le programme standard de triangulation du service de la géodésie de l'*IGN*. Les résultats obtenus sont les coordonnées des sommets des balises. Les inclinaisons ayant été mesurées sur le terrain, on a calculé les écarts en *x* et *y* pour passer du sommet au pied des balises, et on obtient finalement les coordonnées des pieds des balises.

Pour faciliter les comparaisons avec 1959, on a choisi le même système local: coordonnées 1000 mètres pour *T15*, *T15 - DE* comme axe des *x*.

Le tableau N° 8 présente des données du carré de *Milcent*.

5.4 Rattachement des balises de longue durée

Le *Groupe de géodésie B* a déterminé les coordonnées de 10 grandes balises par rattachement au point de cheminement le plus proche. Les calculs ont été faits très simplement, à la main, par rayonnement. Les coordonnées trouvées sont résumées dans le tableau N° 9. Elles sont celles de l'axe du pied des balises. Comme elles se déduisent du cheminement géodésique, elles sont valables le 6 juillet 1967 à zéro heure. Si une compensation doit un jour modifier les coordonnées des sommets du cheminement, celles des balises rattachées devront varier également.

Le tableau N° 9 présente les coordonnées des grandes balises déterminées par le *Groupe de géodésie B* en juillet 1967.

5.5 Hauteurs de neige

Le *Groupe de géodésie B* a noté la hauteur de neige aux balises de 1959 et aux balises implantées en remplacement des disparues. Les observations sont archivées à l'*Institut Géographique National*, 2 avenue Pasteur (94) Saint-Mande, France, dans le dossier «GROENLAND 1967».

5.6 Travaux pour le Groupe de géophysique

En début de campagne, le *Groupe de géodésie B* a mesuré des figures matérialisées par des fanions, au profit du *Groupe de géophysique*. En

Station Centrale il s'agissait de 22 points formant une croix dont une branche avait 10 kilomètres et l'autre 20, plus 4 sommets d'un carré de 6 kilomètres de côtés.

A *Milcent*, la figure comprenait le carré de déformation plus une droite de 4 kilomètres.

A *Carrefour*, c'était une ligne de 7 points sur 6 kilomètres environ.

Les mesures ont été faites au telluromètre, un poste restant fixe et l'autre allant d'un point à l'autre. Tous les calculs ont été faits sur place et les résultats communiqués aussitôt aux intéressés. On n'a pas jugé bon de reproduire les résultats ici : dans la mesure où ils ont un intérêt, on les trouvera dans le rapport des géophysiciens.

5.7 Documentation

Dans le dossier «GROENLAND 1967» archivé à *l'Institut Géographique National, 2 avenue Pateur, (94) Saint-Mande, France*, on trouvera :

- Les originaux des mesures et calculs de *Inter I* et *Inter II*,
- Un cahier de 15 feuilles rassemblant les mesures d'angle, de distance, d'excentrement et d'inclinaison du carré de *Milcent*,
- Les listings de réduction tellurométrique et de compensation du carré,
- Les calculs de rattachement des grandes balises (6 feuilles),
- Le cahier original de mesure des hauteurs de neige,
- 3 cahiers contenant les originaux des mesures et calculs faits pour la géophysique à *Centrale*, *Milcent*, *Carrefour*.

6. CONCLUSION

Le *Groupe de géodésie B* a bénéficié de quelques atouts importants : la grande expérience polaire de FAIVRE, la compétence de MARCANTONI qui a assuré une tellurométrie sans histoires, l'homogénéité de formation des quatre géodésiens, tous de *l'IGN*. Ajoutons que ce groupe était en 1967 le seul groupe scientifique d'une seule nationalité.

Outre qu'il n'y a pas eu de problème de langue, un rien d'esprit de compétition a poussé chacun à donner son maximum pour que le groupe «français» fasse une bonne performance.

L'organisation matérielle des *EPF* a été presque parfaite. On a simplement déploré les contraintes du support hélicoptères. La nécessité de garder une réserve de carburant permettant de rentrer à *Carrefour* et de se replier sur *Jakobshavn* si on ne trouvait pas *Carrefour*, a beaucoup limité le rayon d'action utile.

La rédaction de ce rapport a été différée longtemps par la nécessité de confronter les données avec celles du Groupe A. Ceci ne se faisait que par correspondance ou lors de rencontres bi-annuelles, ce qui est très long. On voulait aussi de toute façon introduire dans les réductions tellurométriques le nivellement de précision de la campagne 1968.

La valeur du travail principal, le cheminement, ne sera connue que lorsque la géodésie danoise aura relié *Cecilia Nunatak* à *Qapiarfitt*. Enfin je tiens à faire remarquer pour conclure que, désigné pour cette mission quatre mois avant le départ, je n'ai participé en rien à la définition des objectifs et au choix des moyens. Dans l'éventualité de nouvelles réalisations analogues, et à la lumière de cette expérience, je proposerais une organisation sensiblement différente, tendant surtout à augmenter la rapidité de l'exécution et à renforcer les contrôles par azimuts astronomiques.

ST-MANDE le 19 mars 1970.

J. VIDAL

Liste des documents archivés dans le dossier «GROENLAND 1967» dans
le lot N° 1

- 1 — Astro: observation de passages du soleil et d'étoiles (9 feuilles).
- 2 — Astro: mesures d'angle soleil-repère (8 feuillets de 4 pages).
- 3 — Astro: cahier de comparaison chrono-radio.
- 4 — Cheminement: observations angulaires (39 feuillets de 4 pages).
- 5 — Cheminement: résumé des mesures d'angles et réductions au centre (35 feuillets de 4 pages).
- 6 — Cheminement: mesures au telluromètre (6 cahiers).
- 7 — Cheminement: comparaisons des baromètres (3 feuilles + 4 graphiques).
- 8 — Cheminement: résumé des données tellu par station (14 feuilles).
- 9 — Cheminement: résumé des données tellu par portée (5 feuilles).
- 10 — Cheminement: *V0 Qapiarfit*, triangles *V3-V4-V5*, *U8A-U9-U9A* (3 feuilles).
- 11 — Pentagones: données résumées et résultats (6 feuilles).
- 12 — Pentagones: observations angulaires et réductions au centre (6 cahiers).
- 13 — Pentagones: mesures tellu (3 cahiers).
- 14 — Pentagones: résumé des données tellu par station (6 feuilles).
- 15 — Pentagones: résumé des données tellu par portée (5 feuilles).
- 16 — Pentagones: résumé des données pour le calcul (6 feuilles).
- 17 — Pentagones: résumé des données pour le calcul (19 feuilles).
- 18 — Divers: observations et calculs *Inter I* et *Inter II* (2 cahiers).
- 19 — Divers: observations et réductions du carré de *Milcent* (un cahier).
- 20 — Divers: calcul du rattachement des grandes balises (6 feuilles).
- 21 — Divers: hauteurs de neige (1 cahier).
- 22 — Divers: travaux pour la géophysique (3 cahiers).
- 23 — Divers: liste du matériel fourni par l'*IGN* (3 feuilles).
- 24 — Documents ayant servi aux calculs:
 - correspondance avec KARSTEN,
 - mesures 1959 des carrés,
 - résultats partiels du nivellement 1968,
 - rapport MÄLZER sur nivellement 1959.
 - tables du soleil de 1967,
 - inclinaisons de balises par *Géodésie A*,
 - 4 notices sur programmes FORTRAN de la géodésie,
 - tables de pression de vapeur saturante,
 - formule et table de correspondance pression-altitude,
 - coordonnées de points géodésiques danois.

Liste des documents archivés dans le dossier «GROENLAND 1967» dans
le lot N° 2 (ordinateur IBM 1130)

Astronomie

- 1 — Calcul des étoiles.
- 2 — Calcul des points astronomiques.
- 3 — Calcul des azimuts astronomiques.
- 4 — Exemple de page du catalogue.
- 5 — Programme de calcul des étoiles.
- 6 — Programme de calcul des points astronomiques.
- 7 — Programme de calcul d'azimut.
- 8 — Programme de calcul du catalogue.

Cheminement

- 9 — Réduction des mesures tellu, cheminement et rattachements.
- 10 — Calcul du cheminement.
- 11 — Calcul des rattachements et inclinaisons de balises 1959.
- 12 — Distances et angles entre positions 1967 des balises 1959.
- 13 — Programme de réduction des mesures tellu.
- 14 — Programme de calcul du cheminement.
- 15 — Programme de calcul de rattachement et inclinaison.
- 16 — Programme de calcul de distances et angles.

Pentagones et carré

- 17 — Réduction des mesures tellu des pentagones.
- 18 — Calcul des pentagones.
- 19 — Réduction des mesures tellu du *Carré de Milcent*.
- 20 — Calcul du *Carré de Milcent*.

Listes des programmes IBM et données (cartes perforées) archivés dans
le lot N° 3 («GROENLAND 1967»)

- 1 — Programme VID01, azimut par l'heure.
- 2 — Programme VID02, réduction des mesures tellurométriques.
- 3 — Programme VID03, catalogue astro.
- 4 — Programme VID04, calcul du cheminement.
- 5 — Programme VID05, rattachements et inclinaisons.
- 6 — Programme VID06, distances et angles entre points.
- 7 — Programme VID09, calcul des étoiles.
- 8 — Programme VID10, point astro.
- 9 — Vide.
- 10 — Données pour calculs d'azimut.
- 11 — Données pour réduction tellu:
cheminement
V3-V4, V4-V5,
rattachements,
Carré de Milcent,
Pentagone.
- 12 — Données pour le catalogue.
- 13 — Données pour le calcul du cheminement.
- 14 — Données pour les calculs de rattachement et inclinaison.
- 15 — Données pour le calcul de distances et angles.
- 16 — Données pour le calcul des étoiles.
- 17 — Données pour le calcul des points astro.

Bibliographie

- COMMIOT, J. 1971. Détermination astronomiques au cours de la campagne 1959 de l'Expédition Glaciologique Internationale au Groenland. Meddr Grønland, Bd. 173, Nr. 1.
- DUHAMEL, M., 1963. Déterminations astronomiques en campagne. Institut Géographique National.
- HOFMANN, W., 1964. Die geodätische Lagemessung über das Grönländische Inlandeis der Internationalen Glaziologischen Grönland-Expedition (EGIG) 1959. Meddr Grønland, Bd. 173, Nr. 6.
- NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, N. dat. The refractive index of air for radio waves and microwaves. National Physical Laboratory.

Tableaux

- | | |
|---------------|--|
| Tableau N° 1. | Coefficients des inconnues $d\varphi$ et dAH des azimuts. |
| Tableau N° 2. | Les écarts à la moyenne et l'erreur des azimuts. |
| Tableau N° 3. | Résultats des déterminations astronomiques de position. |
| Tableau N° 4. | Résultats des mesures d'azimut astronomique. |
| Tableau N° 5. | Mouvement du glacier: effet sur les distances. |
| Tableau N° 6. | Les incertitudes trouvées pour les différents segments. |
| Tableau N° 7. | Les incertitudes de position des stations. |
| Tableau N° 8. | Données du <i>Carré de Milcent</i> . |
| Tableau N° 9. | Coordonnées des grandes balises déterminées par le Groupe de géodésie B en juillet 1967. |

Tableau N° 1.
Coefficients des inconnues $d\varphi$ et dAH des azimuts.

Station	cotgz	sin A	cos A	sin φ	cos φ	coeff. de $d\varphi$	coeff. de dAH
U4	0,06	0,15	0,99	0,94	0,34	0,01	0,92
U16	0,07	0,31	0,95	0,94	0,34	0,02	0,92
U25	0,05	0,06	1,00	0,94	0,33	0,00	0,92
U38	0,05	0,23	0,97	0,95	0,33	0,01	0,93
U53	0,21	0,86	0,46	0,95	0,32	0,18	0,92
TN65	0,17	0,86	0,57	0,95	0,30	0,15	0,92
TN72	0,14	0,83	0,60	0,95	0,30	0,12	0,93

Tableau N° 2.
Les écarts à la moyenne et l'erreur des azimuts.

Station	Écarts à la moyenne			Erreur principale	Erreur totale
U4	− 21"	+ 10"	+ 10"	18"	19"
U16	− 1"	− 7"	+ 8"	7"5	9"
U25	+ 15"	− 14"	− 1"	14"5	15"
U38	− 8"	− 3"	+ 11"	10"	11"
U53	+ 2"	− 8"	+ 6"	7"	9"
TN65	+ 8"	− 26"	+ 18"	23"	24"
T72	+ 9"	− 26"	+ 17"	23"	23"

Tableau N° 3.
Résultats des déterminations astronomiques de position.

Date	Station		Longitude Ouest	Latitude Nord
25.06.67	V7:	coord. astro:	− 53 G 54'28".3	77 G 44'61".1
28.06.	U4:		− 52 72 65 .8	77 57 68 .3
06.07.	U16:		− 49 27 58 .2	78 15 65 .9
10.07.	U25:		− 46 68 02 .0	78 56 23 .3
25.07.	U53:		− 37 18 07 .4	79 28 74 .2
31.07.	TN65:		− 34 77 91 .0	80 43 54 .7
03.08.67	T72 nord		− 31 07 59 .1	80 64 40 .1

Tableau N° 4.
Résultats des mesures d'azimut astronomique.

Date	de	vers	azimut (en grades)
27.06.67	V7	V6	290 G 83'57"
28.06.	U4	U3	271 51 48
06.07.	U16	U15	273 85 93
10.07.	U25	U24	274 63 78
17.07.	U38	T37/5	288 33 86
24.07.	U53	T52/6	292 04 98
30.07.	TN65	TN64	276 20 87
02.08.67	T72	TN71	294 61 42

Tableau N° 5.
Mouvement du glacier: effet sur les distances.

Accroissement de distance		Mesure 1967		Écart au 6 juillet		Variation de	Cumul depuis T0
Station	en 8 ans (mètres)	quotidien (mm)	jour	heure	1967 zéro heure	distance (cm)	
T0							
T1	- 1	0	26-6	21 h	-10 jours 3 h	0	0
T2	+151	+50	27-6	15	- 9	9	- 47
T3	- 8	- 3	27-6	18	- 9	6	- 44
T4	+ 53	+18	27-6	20	- 9	4	- 60
T5	+ 61	+20	28-6	22	- 8	2	- 76
T6	- 5	- 2	29-6	14	- 7	10	- 74
T7	+ 50	+17	29-6	20	- 7	4	- 86
T8	+ 63	+21	30-6	11	- 6	13	- 99
T9	+ 31	+10	30-6	19	- 6	5	-105
T10	+ 53	+18	1-7	14	- 5	10	-115
T11	+ 22	+ 7	2-7	22	- 4	2	-118
T11A	+ 33	+11	3-7	12	- 3	12	-122
T12	+ 42	+14	3-7	16	- 3	8	-126
T13	+ 48	+16	4-7	20	- 2	4	-129
T14	+ 9	+ 3	5-7	11	- 1	13	-129
T15	+ 31	+10	5-7	15	- 1	9	-130
T16	+ 14	+ 5	5-7	18	- 1	6	-131
T17	+ 25	+ 8	6-7	12	+ 0	12	-131
T18	+ 23	+ 8	6-7	18	+ 0	18	-130
T19	+ 28	+ 9	7-7	18	1	18	-128
T20	+ 18	+ 6	7-7	19	1	19	-127
T21	+ 25	+ 8	8-7	18	2	18	-125
T22	+ 14	+ 5	8-7	19	2	19	-124
	+ 16	+ 5	9-7	14	3	14	-122

(Cont.)

Tableau N° 5. *Cont.*

Station	Accroissement de distances		Mesure 1967		Écart au 6 juillet 1967		Variation de	Cumul depuis T0
	en 8 ans (mètres)	quotidien (mm)	jour	heure	zéro	heure	distance (cm)	
T23								
T24	+ 17	+ 6	9-7	14 h	3 jours	14 h	+ 2	-120
T25	+ 19	+ 6	9-7	18	3	18	+ 2	-118
T26	+ 14	+ 5	10-7	13	4	13	+ 3	-115
T27	+ 12	+ 4	10-7	17	4	17	+ 2	-113
T28	+ 11	+ 4	10-7	18	4	18	+ 2	-111
T29	+ 17	+ 6	11-7	12	5	12	+ 3	-108
T30	+ 9	+ 3	11-7	17	5	17	+ 2	-106
TA31	+ 7	+ 2	11-7	18	5	18	+ 1	-105
T32	+ 12	+ 4	12-7	17	6	17	+ 3	-102
T33	+ 10	+ 3	12-7	18	6	18	+ 2	-100
T34	+ 10	+ 3	15-7	14	9	14	+ 3	- 97
T35	+ 9	+ 3	15-7	15	9	15	+ 3	- 94
T36	+ 9	+ 3	16-7	11	10	11	+ 3	- 91
T37	+ 9	+ 3	16-7	15	10	15	+ 3	- 88
T38	+ 8	+ 3	16-7	16	10	16	+ 3	- 85
T39	+ 7	+ 2	17-7	13	11	13	+ 2	- 83
T40	+ 7	+ 2	17-7	17	11	17	+ 2	- 81
T41	+ 8	+ 3	18-7	16	12	16	+ 4	- 77
T42	+ 7	+ 2	18-7	18	12	18	+ 3	- 74
T43	+ 9	+ 3	20-7	12	14	12	+ 4	- 70
T44	+ 9	+ 3	20-7	15	14	15	+ 4	- 66
T45	+ 8	+ 3	20-7	18	14	18	+ 4	- 62
T46	+ 11	+ 4	21-7	12	15	12	+ 6	- 56
T47	+ 10	+ 3	21-7	?	15	?	+ 5	- 51
T48	+ 12	+ 4	22-7	15	16	15	+ 7	- 44
T49	+ 15	+ 5	23-7	0	17	0	+ 8	- 36
T50	+ 22	+ 7	23-7	16	17	16	+12	- 24
T51	+ 20	+ 7	23-7	20	17	20	+12	- 12
T52	+ 22	+ 7	24-7	12	18	12	+13	+ 1
TA53	+ 17	+ 6	24-7	17	18	17	+11	+ 12
T54	+ 14	+ 1	26-7	13	20	13	+ 2	+ 14

Tableau N° 6.
Les incertitudes trouvées pour les différents segments.

Segment	longueur	portées	erreurs sur azimuts			erreur d'orientation et composantes			erreur de distance et composantes			erreur totale en	
A-B	l	n	e ₁	e ₂	e	i	i ₁	i ₂	j	j ₁	j ₂	longi- tude	lati- tude
Qapiarfit-U4	106 kms	9	0	19	14	2,3 m	0,1	2,3	0,45 m	0,4	0,0	0,4	2,3
U 4 – U16	131	16	19	9	15	3,1	1,4	2,7	0,60	0,5	0,3	1,5	2,7
U16 – U25	96	10	9	15	12	1,8	0,8	1,6	0,50	0,4	0,2	0,9	1,6
U25 – U38	125	13	15	11	13	2,5	0,8	2,4	0,54	0,5	0,2	0,9	2,4
U38 – U53	193	22	11	9	10	3,0	0,7	2,9	0,70	0,7	0,1	1,0	2,9
U53 – TN65	138	16	9	24	18	3,9	3,4	2,0	0,60	0,3	0,5	3,4	2,1
TN65 – Cecilia	114	9	24	23	24	4,3	0,9	4,2	0,45	0,4	0,1	1,0	4,2

Tableau N° 7.
Les incertitudes de position des stations.

Point	Incertitude	
	en longitude	en latitude
U4	0,4 mètre	2,3 mètres
U16	1,5	3,5
U25	1,8	3,9
U38	2,0	4,6
U53	2,2	5,4
TN65	4,1	5,8
Cecilia	4,2	7,1

Tableau N° 8.
Données du Carré de Milcent.

Distances			Directions observées		
T15 – DN	502,66 m		T15	DN	399 _G 5096" 0
T15 – DE	504,73		T15	DE	99 _G 5587" 0
T15 – DS	510,18		T15	DS	199 _G 4159" 0
T15 – DW	505,94		T15	DW	299 _G 6856" 0
			DN	DE	0 _G 0000" 0
			DN	DW	100 _G 3871" 0
			DE	DS	0 _G 0000" 0
			DE	DN	100 _G 2775" 0
			DS	DW	0 _G 0000" 0
			DS	DE	99 _G 3125" 0
			DW	DN	0 _G 0000" 0
			DW	DS	100 _G 0225" 0
Coordonnées des sommets (7e élément)			Coordonnées des pieds		
T15	X = 998,10	Y = 1.000,00	T15	X = 1.000,00	Y = 1.000,00
DN	X = 997,14	Y = 1.502,71	DN	X = 998,42	Y = 1.502,06
DE	X = 1.502,74	Y = 1.000,58	DE	X = 1.504,14	Y = 1.000,00
DS	X = 999,83	Y = 489,75	DS	X = 1.001,73	Y = 488,96
DW	X = 492,20	Y = 1.000,43	DW	X = 492,91	Y = 999,45

Tableau N° 9.
*Coordonnées des grandes balises (en grades) déterminées par le
Groupe de géodésie B en juillet 1967.*

Point de rattachement	Longitude Greenwich	Latitude Nord
U4	– 52. 72 52"5	77. 57 89"3
U20	– 48. 12 21"3	78. 34 36"3
U25	– 46. 68 06"1	78. 56 26"3
U31	– 45. 15 43"7	78. 79 02"3
U43	– 41. 46 89"7	79. 02 46"7
T47	– 39. 95 15"1	79. 12 42"0
T50	– 38. 43 22"7	79. 22 40"8
U53	– 37. 18 41"2	79. 28 73"7
T57	– 36. 47 39"5	79. 81 81"1
T61	– 35. 91 58"4	80. 24 98"2