

MÉTHODE POUR LA MESURE PHOTOGRAMMÉTRIQUE DES NUAGES PENDANT LA NUIT, QUAND CES NUAGES SONT ÉCLAIRÉS PAR LA LUNE OU PAR LA LUMIÈRE CRÉPUSCULAIRE

PAR H. SOLBERG ET CARL STØRMER

(Manuscrit reçu par la Commission Géophysique le 18 mai 1925)

§ 1. Introduction.¹

La méthode photogrammétrique, employée pendant les deux expéditions à Bossekop de 1910 et 1913² dans le but de déterminer, par la photographie, l'altitude et la position de l'aurore boréale, aura peut-être une certaine importance pour la météorologie, quand il s'agit d'une mesure photogrammétrique des nuages pendant la nuit.

Pour que cette méthode réussisse, il faut que l'obscurité soit assez avancée pour que les étoiles soient visibles. Comme, d'ordinaire, les nuages ne se distinguent pas nettement sur un fond noir, il faut donc qu'ils soient éclairés. Très propre à cet effet sera la lumière de la lune ou la lumière crépusculaire; mais on peut aussi se servir d'une lumière artificielle, comme de celle d'un gros projecteur électrique. Pour les nuages bas, il sera même suffisant d'employer le reflet de la lumière d'une grande ville ou accidentellement celui d'un incendie.

§ 2. Prise des photogrammes.

En vue des mesures futures d'après cette méthode, nous allons faire connaître ici, à titre d'exemple, les résultats d'un tel essai, effectué à Oslo le soir du 28 janvier 1923.

Les stations étaient 1° l'Observatoire d'Oslo, à 59° 54',7 L. N. et 10° 43',4 L. E. Gr., situé à une altitude de 33 m. au-dessus du niveau de la mer, et 2° celui de Bygdø, avec la position suivante:

$$g = 1918 \text{ m.}, \quad h_0 = -0^{\circ},42, \quad a_0 = 62^{\circ},49;$$

g indique la distance entre les deux stations, tandis que h_0 et a_0 marquent la hauteur au-dessus de l'horizon et l'azimut de la station Bygdø, vue de la station d'Oslo. La hauteur, comptée de -90° à $+90^{\circ}$, est positive au-dessus de l'horizon et négative au-

¹ Le présent travail est le résultat d'une collaboration, la prise des photogrammes et des photographies ayant été faite par M. Størmær et les considérations purement météorologiques par M. Solberg. Le dessin et les mesures des photogrammes et les calculs correspondants ont été d'abord faits par M. Størmær et M^{lle} Agnes Gundersen et ensuite refaits, vérifiés et corrigés par M. Solberg.

² C. Størmær: Bericht über eine Expedition nach Bossekop zwecks photographischer Aufnahmen und Höhenmessungen von Nordlichtern. Videnskapsselskapets Skrifter. Math. Nat. kl. 1911.

C. Størmær: Rapport sur une expédition d'aurores boréales à Bossekop et Store Korsnes pendant le printemps de l'année 1913. Geofys. Publ. Vol. I, no. 5.

dessous, et l'azimut, compté de 0° à 360° et commençant au sud, est positif dans le sens du mouvement diurne du ciel. h_0 et a_0 donnent les coordonnées du « point de base ».

Les observateurs communiquaient par téléphone; pour que leurs bras fussent libres pendant le travail, le récepteur téléphonique et le microphone étaient fixés sur la tête et sur la poitrine. Le travail fut dirigé de Bygdø par M. Størmer avec M. Tveter comme assistant à l'autre station.

Les appareils photographiques étaient d'un type identique à celui employé pour la photographie des aurores boréales, et dont l'essentiel consiste dans l'emploi d'une lentille de cinéma, d'une intensité lumineuse si grande que la distance focale ne dépasse jamais le double du diaphragme de la lentille. En ce qui concerne les plaques, il est recommandable de s'en servir d'un des types les plus sensibles. Pour éviter l'observation continue d'une montre et la notation de l'heure de la prise des photogrammes, les appareils étaient munis d'un mécanisme, permettant de photographier en même temps, sur la même plaque, et les nuages et le cadran éclairé d'une montre. Il est alors facile plus tard de connaître l'heure de la prise des photogrammes, en regardant la photographie de la montre.

Ledit soir du 28 janvier 1923, une grande partie du ciel, surtout vers l'ouest, était couverte par d'étroites bandes de nuages, d'une forme caractéristique et bien marquée, se prêtant ainsi parfaitement à une mesure photogrammétrique. Ces bandes, en réalité parallèles, mais, par un effet de perspective, convergentes vers deux points opposés de l'horizon, situés à peu près au nord-ouest et au sud-est, étaient très légères, permettant ainsi le passage des rayons lumineux de la lune et des étoiles; comme, au reste, le ciel était tout-à-fait clair, les bandes, très éclairées par la lune, se découpaient très nettement sur le fond noir. Evidemment il s'agissait des bandes de cirrus, dites aussi bandes polaires.

En quarante minutes, de $21^h 24^m$ à $22^h 4^m$ T. M. E. C. (Temps Moyen d'Europe Central), 12 photogrammes de ces bandes de cirrus ont été pris, dont 7 de réussis. La pose fut environ de 15^s , mais elle aurait pu sans inconvénient être restreinte au tiers ou moins encore.

§ 3. Méthode pour la mesure et le calcul des photogrammes.

Pour être complets nous allons reproduire ici l'un des photogrammes les plus réussis, et donner en même temps une description détaillée de la méthode employée pour en faire la mesure et le calcul.

Le photogramme, pris à $21^h 35^m 44^s$, se voit sur la planche IV, fig. 16 et 17. Les appareils photographiques ont été pointés sur l'étoile Procyon, qui avec les deux étoiles voisines β Canis minoris et λ Gemini ont servi d'étoiles de référence.

Pour la mesure, on a d'abord placé chaque négatif dans un appareil à projection, et projeté l'image agrandie sur un mur, à une distance telle qu'un degré au centre de l'image était égal à un centimètre. Pour chaque négatif on a alors dessiné sur du papier blanc, le plus exactement possible, les contours des bandes de nuage, les étoiles photographiées et le centre de l'image; ce sont les deux dessins d'après les négatifs d'Oslo et de Bygdø qui ont servi de base à la mesure ultérieure. Pour plus amples détails concernant ces méthodes, on est renvoyé aux rapports déjà cités des expéditions d'aurores boréales de 1910 et 1913.

D'après l'heure de la prise du photogramme on trouvera facilement, par les méthodes astronomiques habituelles, le temps sidéral correspondant; il était égal à $5^h 46^m 58^s$. De là on calculera pour toutes les étoiles de référence l'altitude h et l'azimut a aussi bien que l'angle k entre le cercle vertical et le cercle de déclinaison de l'étoile. En désignant par φ la latitude de la station d'Oslo, par δ la déclinaison d'une étoile, et en se

souvenant que l'angle horaire t d'une étoile est égal au temps sidéral moins l'ascension droite de celle-ci, on aura les formules suivantes :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t$$

$$\sin a = \cos \delta \sin t \sec h$$

$$\cos a = -\cos \varphi \sin \delta \sec h + \sin \varphi \cos \delta \cos t \sec h$$

$$\sin k = \sin a \cos \varphi \sec \delta = \sin t \cos \varphi \sec h.$$

Le résultat du calcul fut :

Étoile	h	a	k
α Canis minoris.....	31,75	360—32,21	—15,58
β „ „	35,46	360—29,61	—14,51
λ Geminorum.....	44,00	360—29,46	—14,92

Ensuite on fera le calcul des angles suivants: l'angle u entre la direction d'Oslo à Bygdø, direction qui coupe la sphère céleste au point de base, et la direction d'Oslo à l'étoile, l'angle λ entre le cercle vertical de l'étoile et le grand cercle passant par l'étoile et le point de base et enfin l'angle ω entre le même grand cercle et un petit cercle passant par le point de base et parallèle à l'horizon. Les formules sont :

$$\cos u = \sin h_0 \sin h + \cos h_0 \cos h \cos (a-a_0)$$

$$\cotg \lambda = -\tg h_0 \cos h \operatorname{cosec} (a-a_0) + \sin h \cotg (a-a_0)$$

$$\sin u \sin \lambda = \cos h_0 \sin (a-a_0)$$

$$\cos \omega = \sec h_0 \cos h \sin \lambda.$$

Le résultat fut pour les mêmes étoiles :

u	λ	ω
180—85,79	180+87,88	180—31,81
180—88,05	180+89,12	180—35,46
180—88,30	180+88,95	180—44,00

Ces angles furent ensuite marqués sur les dessins, et grâce aux réseaux décrits dans le rapport sur l'expédition de 1913, les valeurs des angles h , a , u_1 et ω furent mesurés d'une manière simple en une série de points, choisis sur le dessin d'Oslo et situés sur les bords des bandes de nuages. Les grands cercles passant par le point de base et les points choisis purent ensuite, à l'aide des angles ω mesurés, être retrouvés sur le dessin de Bygdø, qui, enfin, servit à la mesure de l'angle u_2 .

Nous jugeons préférable de donner les résultats de ces mesures un peu plus tard, pouvant les présenter alors en relation avec les mesures des autres photogrammes, et nous passons directement aux calculs de l'altitude et de la position des nuages dans l'espace.

On aura d'abord pour la distance r d'Oslo aux nuages :

$$r = g \sin u_2 \operatorname{cosec} (u_2 - u_1).$$

r étant petit, comparé avec les dimensions de la terre, il est permis de considérer la surface de la terre comme plane; par conséquent, l'altitude H d'un nuage au-dessus de la mer est donnée en kilomètres par la formule:

$$H = r \sin h + 0,033,$$

0,033 étant l'altitude d'Oslo, tandis que la distance D d'Oslo au point ayant le nuage au zénith, est donnée par

$$D = r \cos h.$$

§ 4. Résultats des mesures.

Dans ce paragraphe, nous allons donner un aperçu des résultats des mesures dans un ordre chronologique. Les dessins correspondants aux photogrammes sont reproduits sur la planche I, tandis que la projection des nuages sur le niveau de la mer se voit sur la planche II. Les meilleurs photogrammes, les no. 1 et 3, sont reproduits sur la planche IV.

Faute de place nous avons été obligés d'omettre les calculs concernant les étoiles de référence, et de nous restreindre à la reproduction des mesures directes, effectuées sur les dessins.

L'heure indiquée pour la prise des photogrammes se rapporte au milieu de la pose.

1. 21^h 28^m 44^s. Pose d'environ 15^s. (Planche I, fig. 1).

Ce photogramme, pris vers le Canis minor, montre deux bandes parallèles; celle de gauche d'une largeur double de celle de droite. Cette dernière étant très faible, les points mesurés ont tous été choisis sur les bords I et II de la large bande, desquels le bord I surtout doit donner la détermination exacte de l'altitude du nuage. Voici le résultat des mesures:

Point	u_1	u_2	r	h	H	D	a		
Bord I	1.....	87,0	180—85,2	14,08	42,5	9,55	9,65	10,38	360—23,0
	2.....	180—88,9	180—82,35	16,67	36,55	9,96		13,39	360—28,5
	3.....	180—85,45	180—79,65	18,67	30,55	9,52		16,08	360—32,5
	4.....	180—83,45	180—78,3	20,92	27,05	9,55		18,63	360—34,7
Bord II	5.....	82,1	89,2	15,52	38,75	9,75	9,69	12,10	360—16,85
	6.....	85,35	180—88,1	16,81	34,4	9,53		13,87	360—21,5
	7.....	88,6	180—85,75	19,43	30,1	9,78		16,81	360—25,7

2. 21^h 34^m 39^s. Pose d'environ 10^s. (Planche I, fig. 2).

Les mêmes bandes, photographiées vers les Gemini, plus haut sur le ciel. La faible bande du précédent photogramme est à peu près disparue, tandis que la large bande s'est nettement divisée en deux bandes séparées; par conséquent, les nuages doivent être en voie de dissolution.

Les points choisis sont tous situés sur le bord I du précédent photogramme; les mesures, un peu incertaines, il est vrai, ont donné comme résultat:

Point	u_1	u_2	r	h	H	D	a		
Bord I	1.....	85,2	180—86,0	12,51	50,35	9,67	9,58	7,98	360—19,15
	2.....	88,2	180—83,55	13,28	45,45	9,50		9,32	360—24,3
	3.....	180—88,8	180—81,45	14,83	40,0	9,57		11,36	360—28,55

3. 21^h 35^m 44^s. Pose d'environ 15^s. (Planche I, fig. 3 et planche IV, fig. 16 et 17).

La même bande double, photographiée vers le Canis minor. Ce photogramme a déjà été employé comme exemple au paragraphe précédent; étant très distinct, il doit fournir de bonnes mesures:

Point	u_1	u_2	r	h	H	D	a		
Bord I	1.....	89,9	180-81,85	13,23	43,0	9,06	9,62	9,68	360-27,0
	2.....	180-87,6	180-80,4	15,09	39,05	9,54		11,72	360-30,3
	3.....	180-84,85	180-78,65	17,41	34,55	9,90		14,34	360-33,6
	4.....	180-82,8	180-77,35	19,70	30,3	9,97	9,53	17,01	360-35,8
	5.....	87,0	180-85,2	14,08	42,9	9,61		10,31	360-23,1
	6.....	88,95	180-83,75	15,01	39,25	9,46		11,62	360-25,9
	7.....	85,4	180-86,45	13,50	43,8	9,37	9,53	9,74	360-20,8
	8.....	87,45	180-84,95	14,45	40,55	9,43		10,99	360-23,9
	9.....	89,5	180-83,7	16,10	37,35	9,80		12,80	360-26,7
Bord II	10.....	83,05	180-88,95	13,78	42,3	9,30	9,64	10,19	360-17,7
	11.....	85,8	180-87,1	15,50	38,85	9,75		12,07	360-21,65
	12.....	88,85	180-84,75	17,13	35,05	9,87		14,03	360-25,75

Comparons les résultats des mesures des trois photogrammes précédents.

Pour l'altitude moyenne du bord I nous avons trouvé les valeurs 9,65, 9,58 et 9,62 km. et pour celle du bord II les valeurs 9,69 et 9,64 km. Autant que le permettent les inévitables fautes de mesure, les bords peuvent donc être considérés comme situés à la même altitude; toutefois il y a lieu de noter que les nuages possèdent un petit mouvement descendant d'environ 0,1 m. sec.⁻¹, et que le bord I, qui se trouve le plus avancé vers le nord-est, est situé un peu plus bas que le bord II (à une moyenne d'une cinquantaine de mètres).

La projection des nuages sur le niveau de la mer se voit sur la carte planche II, fig. 12, où les deux bords I et II sont donnés en lignes tracées pour le photogramme 1, en lignes pointillées pour le photogramme 2 et en lignes réglées pour le photogramme 3. Dans les sept minutes comprises entre la prise des photogrammes 1 et 3, le mouvement des bandes perpendiculairement à leur direction longitudinale est d'environ 925 mètres vers le nord-est, ce qui donne pour la vitesse transversale une valeur de 2,2 m. sec.⁻¹.

Il est généralement admis que les bandes de cirrus ont tiré leur origine d'un mouvement ondulatoire d'une surface limite, les nuages se formant alors dans l'air ascendant dans le voisinage des sommets de la vague. Mais si le mouvement en général, abstraction faite du mouvement ondulatoire, est ascendant, il se peut que la condensation ait aussi lieu dans l'air aux environs des vallées, pourvu que le contenu de vapeur d'eau soit suffisant. Si ce mouvement ascendant cesse d'exister, ou mieux encore s'il se change en un mouvement descendant, entraînant ainsi une évaporation, ce sont naturellement les nuages des vallées qui vont se vaporiser les premiers.

C'est exactement une telle évolution que les bandes de cirrus en question sont en train de subir. La fente, parue dans le milieu de la large bande après la prise du premier photogramme, s'est formée dans la partie la plus basse de la vague, comme il suit des mesures du photogramme 3, où les points 5-9, situés près de cette fente, possèdent une altitude moyenne de 9,53 km., soit de 100 m. plus basse que l'altitude moyenne des bords I et II. En même temps le reste de la large bande a subi une

diminution, sa largeur s'étant réduite de 1900 m. à 1800 m. dans les sept minutes d'intervalle entre la prise des photogrammes 1 et 3.

D'après ces résultats, il est possible de calculer la longueur d'onde et l'amplitude du mouvement ondulatoire, ce qui, à son tour, peut servir de base à des considérations théoriques, concernant la constitution de la surface-limite. Mais, les résultats n'étant pas complètement prouvés pour le moment, nous allons remettre ces calculs à une autre fois.

4. 21^h 44^m 49^s. (Planche I, fig. 4).

Trois bandes parallèles, vers les Gemini. La bande de gauche est celle précédemment photographiée, avec les bords I et II; elle est maintenant très faible et presque dissoute. Nous avons tout de même choisi deux points sur le bord II, mais les mesures en sont très incertaines. Les mesures de la large bande du milieu avec les bords III et IV paraissent, par contre, plus sûres. La bande de droite, enfin, est trop faible pour être employée ici. Les résultats des mesures sont:

Point	u_1	u_2	r	h	H	D	a		
Bord II	1.....	88,75	180-83,35	13,86	44,5	9,75	9,74	9,89	360-25,3
	2.....	180-87,7	180-80,55	15,20	39,65	9,73		11,70	360-30,2
Bord III	3.....	84,15	180-88,25	14,50	42,0	9,73	9,86	10,77	360-19,1
	4.....	88,5	180-84,75	16,25	37,3	9,88		12,93	360-25,25
Bord IV	5.....	180-87,3	180-81,45	18,61	32,3	9,98	9,87	15,73	360-30,5
	6.....	77,35	84,45	15,44	38,9	9,73		12,02	360-10,5
	7.....	81,1	87,45	17,32	35,6	10,11		14,08	360-16,05
	8.....	84,65	180-89,45	18,66	32,15	9,96		15,80	360-20,9
	9.....	88,65	180-86,1	20,91	28,4	9,97		18,39	360-25,8
	10.....	180-87,85	180-83,1	23,00	24,5	9,57		20,93	360-29,8

5. 21^h 46^m 24^s. (Planche I, fig. 5 et planche IV, fig. 18 et 19).

Les mêmes bandes. La pose étant plus longue que précédemment, les bandes sont plus distinctes. Voici les résultats:

Point	u_1	u_2	r	h	H	D	a		
Bord II	1.....	89,6	180-82,85	14,48	42,7	9,85	9,72	10,64	360-26,6
	2.....	180-87,35	180-80,4	15,53	38,3	9,66		12,19	360-30,6
	3.....	180-83,7	180-77,7	17,93	32,4	9,64		15,14	360-34,85
Bord III	4.....	84,65	180-87,9	14,78	41,85	9,89	9,78	11,01	360-20,0
	5.....	87,5	180-85,55	15,80	38,05	9,77		12,44	360-24,0
	6.....	180-89,0	180-82,8	17,62	33,3	9,71		14,73	360-28,5
	7.....	180-86,0	180-80,5	19,74	29,45	9,74		17,19	360-32,0
Bord IV	8.....	77,1	84,25	15,33	39,0	9,68	9,80	11,91	360-10,4
	9.....	80,7	87,2	16,92	35,55	9,87		13,77	360-15,7
	10.....	84,1	90,0	18,66	31,8	9,87		15,86	360-20,4
	11.....	88,1	180-86,7	21,13	27,45	9,77		18,75	360-25,25
	12.....	180-89,25	180-84,55	23,30	24,75	9,79		21,16	360-28,2
	13.....	75,05	80,6	19,57	30,1	9,84		16,93	360-9,65
	14.....	77,75	83,25	19,87	27,9	9,33		17,56	360-13,3
	15.....	81,65	86,55	22,42	25,1	9,54		20,30	360-18,1
	16.....	74,55	79,4	22,30	25,7	9,70		20,09	360-9,7
	17.....	77,35	81,95	23,25	23,7	9,38		21,29	360-13,3

D'après les deux derniers photogrammes, le bord II se trouve à une altitude moyenne de 9,74 et 9,72 km., des valeurs un peu plus grandes que celles trouvées dans les photogrammes 1 et 3 (9,69 et 9,64 km.); mais cette différence n'est probablement pas réelle, le bord étant devenu trop faible pour une mesure certaine. La grande altitude des bords III et IV est remarquable; malgré une incertitude due à des fautes de mesure considérables, et qui se manifeste par un trop grand mouvement descendant dans l'espace de temps compris entre la prise des deux photogrammes (75 m. à 95 sec.), il faut conclure que la bande III—IV est située plus haut que la bande précédente I—II. Par conséquent, il doit exister un mouvement ondulatoire avec une longueur d'onde beaucoup plus grande que celui formant les bandes.

Comme la projection de ces bandes sur le niveau de la mer est à peu près coïncidente, nous n'avons reproduit que le photogramme 5 (les bandes de la partie sud-est de la carte planche II, fig. 13). En le comparant avec le photogramme 3 on voit que le bord II a continué son mouvement perpendiculairement à sa direction longitudinale, la vitesse moyenne étant de 2,6 m. sec.⁻¹ dans les 10^m 40^s entre les deux prises, c'est-à-dire à peu près la même que pendant les sept minutes précédentes (2,2 m. sec.⁻¹).

6. 21^h 48^m 29^s. (Planche I, fig. 6).

Des bandes faibles, très hautes sur le ciel, vers le Ursa major; un seul bord a pu servir à la mesure, dont les résultats sont certains à cause de la parallaxe considérable. Les voici:

Point	u_1	u_2	r	h	H	D	a	
1	180—66,8 ^o	180—57,95 ^o	10,57	64,1 ^o	9,54	} 9,60	180+35,05 ^o	
2	180—64,1	180—55,5	10,57	63,85	9,52		4,66	180+49,2
3	180—61,2	180—53,1	10,89	61,7	9,62		5,16	180+64,75
4	180—58,85	180—51,3	11,39	58,05	9,70		6,03	158+78,3

La projection horizontale du bord se voit sur la carte planche II, fig. 13 au nord-est d'Oslo.

7. 22^h 3^m 14^s. (Planche I, fig. 7).

Des bandes vers les Gemini. Un seul bord est choisi, dont les mesures donnent les résultats suivants:

Point	u_1	u_2	r	h	H	D	a	
1	85,3 ^o	180—84,1 ^o	10,37	66,75 ^o	9,56	} 9,26	360—14,4 ^o	
2	88,4	180—81,4	10,71	60,95	9,40		5,20	360—23,2
3	180—88,95	180—79,2	11,13	55,95	9,25		6,23	360—28,7
4	180—86,85	180—77,55	11,59	51,55	9,11		7,21	360—32,2
5	180—84,95	180—76,25	12,32	47,55	9,12		8,32	360—34,8
6	180—83,85	180—75,55	12,87	44,9	9,12		9,12	360—36,0

L'altitude moyenne est donc de 3 à 400 mètres plus basse qu'auparavant. Ce résultat provient peut-être en partie des fautes de mesures, le photogramme d'Oslo étant mal réussi; mais il y a aussi lieu de croire qu'en réalité ce bord est situé plus bas que ceux précédemment mesurés. Car, un quart d'heure s'étant écoulé depuis la prise du photogramme précédent, un petit mouvement descendant d'une intensité de quelques centimètres par seconde seulement, suffira pour produire ce résultat. Et précédemment nous

avons déjà constaté un petit mouvement descendant du bord I (photogramme 1—3) de 0,1 m. sec.⁻¹, ce qui aurait produit une différence d'altitude de 180 mètres, s'il avait continué ininterrompu pendant la demi-heure écoulée. La projection horizontale se voit de la carte, planche II, fig. 13.

§ 5. Prise de photographies à une seule station pour déterminer la direction des bandes.

Par les projections horizontales des cartes planche II, fig. 12 et 13 on voit que les bandes étaient à peu près parallèles et dirigées de N 50° W à S 50° E en moyenne. Cependant, la détermination de cette direction n'est pas sûre, les photogrammes étant pris haut sur le ciel et ne contenant, par conséquent, qu'une petite coupe des bandes. Pour en avoir de plus grandes il faut photographier des bandes situées bas sur le ciel, vers l'horizon. Comme ces photogrammes sont peu convenables à la mesure de la parallaxe, il suffit de les prendre à une seule station. En admettant que tous les points d'un bord de nuage se trouvent à la même altitude on possède alors toutes les quantités nécessaires pour déterminer la projection du bord sur le niveau de la mer; la valeur de cette altitude choisie est d'ailleurs indifférente, puisqu'il ne s'agit que d'une détermination de la direction des bandes.

Dans ce but, on a pris quelques photographies de la station de Bygdø, dont nous allons employer quatre de bien réussies. Les deux premières furent prises aussitôt après le dernier photogramme, dont les nuages possédaient une altitude moyenne de 9,3 km.; cette valeur a donc été choisie pour l'altitude constante des bandes. Pour les deux dernières photographies, prises seulement vers minuit, nous avons enfin choisi une altitude constante de 9 km. juste pour les bandes, puisqu'il est vraisemblable que l'altitude est allée en diminuant dans le temps écoulé après la prise des photogrammes. Une reproduction de ces deux photographies se voit sur la planche IV, fig. 20 et 21.

Ci-dessous nous présentons les résultats des mesures de ces quatre photographies:

22^h 4^m 54^s. (Pl. I, fig. 8).

Point	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>a</i>
1.....	36,2	12,71	360—84,0
2.....	31,5	15,18	360—78,0
3.....	36,0	12,80	360—87,8
4.....	31,15	15,39	360—80,95
5.....	26,35	18,78	360—74,9
6.....	22,4	22,56	360—70,0

23^h 40^m 24^s. (Pl. II, fig. 10 et pl. IV, fig. 20).

Point	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>a</i>
1.....	19,5	25,42	180
2.....	21,4	22,97	180+ 9,4
3.....	22,9	21,31	180+ 19,4
4.....	23,8	20,41	180+ 32,0
5.....	13,6	37,20	180— 4,0
6.....	15,0	33,59	180+ 4,0
7.....	16,3	30,78	180+ 14,0
8.....	17,45	28,63	180+ 23,4
9.....	18,15	27,45	180+ 34,0

22^h 6^m 14^s. (Pl. II, fig. 9).

Point	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>a</i>
1.....	15,1	34,47	180—31,25
2.....	21,75	23,31	180—20,2
3.....	27,45	17,90	180— 9,6
4.....	30,3	15,92	180— 2,5
5.....	18,15	28,37	180—17,85
6.....	22,35	22,62	180— 9,65

23^h 41^m 14^s. (Pl. II, fig. 11 et pl. IV, fig. 21).

Point	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>a</i>
1.....	23,25	20,95	180+ 55,75
2.....	22,05	22,22	180+ 66,05
3.....	20,0	24,73	180+ 76,7
4.....	17,5	28,54	180+ 85,65
5.....	15,35	32,79	360—87,7
6.....	17,95	27,78	180+ 55,2
7.....	16,8	29,81	180+ 65,4
8.....	14,95	33,71	180+ 76,0
9.....	12,9	39,30	180+ 84,95
10.....	10,95	46,52	360—88,4

Les deux dernières bandes étaient beaucoup plus épaisses que les bandes des photographies. C'est ainsi que l'étoile ι Herculis est invisible dans le milieu de la bande de l'avant-dernière photographie, quoique la pose en ait été très longue, à en juger par l'impression photographique qu'ont faite les petites étoiles de Draco et de Lyra, situées en dehors de la bande.

Sur la dernière photographie il ne reste même qu'une seule étoile de visible (Arcturus), δ , ϵ et η Bootis étant tout-à-fait cachées par la large bande de nuages. Pour orienter la photographie nous avons photographié cette constellation de la même place, exactement un an plus tard, pour que les étoiles pussent prendre la même position relativement aux contours du paysage que l'on voit sur la planche IV, fig. 21.

De la projection des bandes sur le niveau de la mer (Pl. III, fig. 14) il résulte que les deux dernières photographies, prises vers le nord et vers l'est, montrent deux différentes coupes d'une même bande, dirigée de N 50° W à S 50° E en moyenne, et s'étendant de Randsfjord jusqu'à la Suède, en passant au nord-est du lac Øieren. Sa largeur était considérable: de 7 km. en moyenne.

§ 6. Comparaison avec d'anciennes mesures de cirrus.

Dans ce qui précède nous avons pu constater, par une méthode précise et donnant des résultats exacts, que les bandes de cirrus photographiées étaient situées à une altitude moyenne d'au moins 9,5 km. au-dessus du sol.

Comparons cette valeur à celles trouvées antérieurement par la méthode photogrammétrique généralement employée, qui en principe a été identique à celle développée ici, la prise des photographies ayant, pourtant, été limitée aux heures de grand jour.

Cette méthode a surtout été pratiquée pendant l'année 1896—97, une convention internationale ayant alors organisé une étude approfondie des nuages dans les différentes parties du globe. Parmi les très intéressants résultats obtenus par là, il y a lieu de mentionner ceux qui nous intéressent surtout dans ce rapport, à savoir les mesures de l'altitude des cirrus, effectuées à Upsal, Suède, à 59,9 degrés de latitude nord, et à Potsdam, près de Berlin, à 52,4 degrés de latitude nord. Les valeurs moyennes obtenues pendant l'hiver ont été de 6,98 km. à Upsal et de 8,07 km. à Potsdam, indiquant ainsi qu'une grande diminution de l'altitude des cirrus a lieu vers les plus hautes latitudes.

Les mesures ont été poursuivies plus tard à Potsdam, où, à présent, un seul observateur suffit pour la prise des photographies, grâce à la construction de l'appareil automatique de M. Sprung pour la mesure photogrammétrique des nuages. Dans cet appareil, l'exposition et le changement des plaques s'effectuent au moyen de rouages, mus simultanément aux deux stations par un courant électrique.

Bien que la distance entre les deux stations soit aussi grande que 1946 mètres, et que les parallaxes en deviennent par conséquent très considérables, il y a quand même lieu d'admettre qu'une détermination exacte de l'altitude des bandes de cirrus soit difficilement réalisable, et cela parce que la ligne de base, dirigée de WNW à ESE, est peu favorable à la mesure de la parallaxe de ces bandes. Car, celles-ci possèdent pour la plus grande partie cette même direction, étant ainsi parallèles à la ligne de base et à la direction de la parallaxe, de sorte que seulement les bandes rayées en travers, c'est-à-dire celles possédant une structure de cirro-cumulus donnent une parallaxe utilisable, tandis que les bandes possédant une structure de cirro-stratus n'en donnent aucune. S'il existe une différence d'altitude entre ces deux formes, ce qui paraît vraisemblable, il y a lieu d'admettre que l'altitude moyenne des bandes, trouvée par les mesures potsdamiennes, ne correspond qu'à la première forme, celle possédant une structure de cirro-cumulus.

Considérons de plus près les résultats de ces mesures, effectuées pendant vingt années de recherches, de 1900 à 1920, et publiées récemment par M. Süring¹.

En ce qui concerne les plus hauts nuages, on a d'abord conservé la tripartition classique, en les divisant en trois groupes principaux, les cirrus, les cirro-stratus et les cirro-cumulus. Les deux premiers groupes ont en outre subi une classification plus détaillée, étant divisés en huit différentes formes de cirrus et trois différentes formes de cirro-stratus.

Parmi ces formes de cirrus se trouvent aussi les bandes. L'altitude moyenne de celles-ci, trouvée pendant les trois mois d'hiver (décembre à février), est de 8,11 km., ou presque égale à l'altitude moyenne pour toutes les formes de cirrus, qui pendant la même période est de 8,12 km., indiquant ainsi que les bandes se forment dans un niveau moyen de la région des cirrus. Mais en prenant aussi en considération les valeurs moyennes pour les autres mois de l'année, il en suit qu'elles sont une des formes les plus hautes. On peut établir cela d'autant mieux, que les bandes photographiées doivent, de préférence, appartenir aux formes de cirro-cumulus, qui se trouvent dans un niveau plus bas que les formes de cirro-stratus, comme il ressort des mesures.

Il est intéressant de constater, comme l'a fait M. Süring, en comparant les résultats des mesures photogrammétriques et des sondages simultanés de Lindenberg, que les différentes formes de cirrus sont toujours situées dans la troposphère, le niveau moyen des cirrus étant environ de 1,5 km. au-dessous de la stratosphère.

L'altitude moyenne des cirrus, trouvée pendant les vingt hivers à Potsdam (8,12 km.) correspond tout à fait à la valeur, trouvée pendant l'hiver 1896—97 (8,07 km.); comme la valeur d'Upsal était d'environ 1 km. plus petite, on est ainsi amené à cette conclusion que le niveau moyen des cirrus à Oslo (de la même latitude qu'Upsal) est à peu près de 7 km. pendant les mois d'hiver. Il est à noter que cette diminution de l'altitude des cirrus avec la latitude s'accorde bien avec une diminution correspondante de l'étendue verticale de la troposphère.

En revenant alors aux bandes de cirrus photographiées, qui étaient situées dans un niveau de 9,5 km. au-dessus de la mer, la comparaison avec d'anciennes mesures a conduit à la conclusion qu'elles se trouvent beaucoup plus hautes que les formes moyennes de cirrus à Oslo (7 km.).

Quel est donc la cause de cette altitude, vraiment extraordinaire? Pour trancher cette question il est nécessaire, avant tout, d'examiner de près la situation météorologique, pendant laquelle les bandes ont paru.

§ 7. Les conditions météorologiques du 28 janvier 1923.

Nous allons d'abord donner une analyse détaillée des événements météorologiques pendant la période de la prise des photogrammes. L'analyse sera surtout basée sur les cartes synoptiques de l'Institut Météorologique de Bergen, donnant les éléments météorologiques d'un grand nombre de stations d'Europe et quelquefois de celles d'Atlantique quatre fois par jour, à 2^h, 8^h, 14^h et 19^h T.M.E.C.

La période en question était marquée par une grande intensité de cyclones. C'est ainsi que le 27 janvier 1923 le temps de l'Europe nord-ouest était influencé par un violent cyclone, qui à une très grande vitesse était venu de l'Atlantique à travers la Scandinavie centrale jusqu'à la Russie. Derrière le cyclone un courant d'air polaire, provenant de la Mer Arctique, se fauflait violemment vers le sud, produisant ainsi une très grande tempête

¹ R. Süring: Photogrammetrische Wolkenforschung in Potsdam in den Jahren 1900 bis 1920. Veröff. des Preuss. Met. Inst., Abh. Bd. VII, Nr. 3, Berlin (1922).

de NW, avec une chute continue de neige et un abaissement de température sur le versant occidental de la chaîne de montagnes norvégienne. Sur le versant oriental, par contre, l'invasion de l'air polaire était accompagnée de phénomènes liés avec la situation de foehn, et se manifestant surtout par une diminution considérable de la quantité de vapeur d'eau, entraînant par là la dissolution des nuages cycloniques dans les couches basses de l'atmosphère.

Le vent à la surface de la terre diminuait peu à peu en tournant au nord, marquant par là, comme le faisaient aussi d'autres indices caractéristiques, que ce cyclone était le dernier membre de sa famille cyclonique.¹

Le premier membre de la famille succédante n'était pas très éloigné; sa bande de pluie était déjà visible sur les côtes d'Irlande au matin du 27 janvier, et pendant les 24 heures suivantes elle avait envahi toute l'Irlande, l'Angleterre et la côte nord-ouest de France, comme il ressort des isochrones du commencement de la pluie.

Le courant d'air polaire subsiste encore au-dessus de la Scandinavie et de la Mer du Nord, d'où les bateaux rapportent toujours une grande brise du nord-ouest, malgré le voisinage du nouveau front, dont les cirrus produisent déjà des halos autour du soleil (par exemple observés à 8 h. le matin du 28 du bateau «Bessheim» à 56 degrés de latitude nord et à 2,4 degrés de longitude est de Greenwich). A cause de cette persistance très prononcée du courant d'air polaire, il est naturel de douter que le nouveau cyclone soit capable de se frayer un passage vers le nord-est, suivant ainsi la route de ses prédécesseurs, mais on peut penser qu'il est, au contraire, obligé de se propager vers l'est ou même vers le sud-est. Cela arriva aussi; le lendemain (le 29) il passa au sud de la Norvège du côté de la Pologne.

La figure 15 (Planche III) donne la carte synoptique du temps au soir du 28 janvier, à 19^h T.M.E.C. Outre des lignes d'égale pression (en millibars) on a tracé des lignes pointillées indiquant la position des fronts, et des zones ombrées indiquant les régions où il pleuvait au moment de l'observation.

La bande de pluie appartenant au cyclone en question, — qui, d'après la nomenclature des météorologistes de Bergen, est indiqué par le nombre 6₁ (le premier membre de la sixième famille, depuis le commencement de l'année), — s'étend du minimum barométrique (*L*) au-dessus d'une région comprenant le sud d'Islande, la Mer du Nord, l'Allemagne de l'Ouest et la France Centrale. Le cyclone se trouve déjà dans le stade d'occlusion², le secteur chaud proprement dit ayant disparu de la surface de la terre; mais comme l'air à l'avant du front est récemment arrivé des régions polaires, il est plus froid que l'air de derrière le front, qui provient de l'Atlantique, de sorte que le front se comporte principalement comme un front chaud, la pluie se produisant conséquemment en avant de la discontinuité à la surface de la terre. Cet effet est surtout très prononcé en Ecosse, où la discontinuité de température se trouve entre Aberdeen (6°,7) et Wick (2°,8), tandis que la pluie s'étend au moins 150 km. plus avant. Lerwick, à une distance de 250 km. du front, rapporte ainsi que le ciel était couvert par alto-stratus, tandis que le bateau «Hellig Olav»; en route pour l'Amérique, et situé dans la zone de pluie au nord de l'Ecosse, indique le temps du commencement de la pluie à 15^h; elle n'a cessé qu'à 4^h au matin du 29.

Il paraît peut-être un peu étrange que la zone de pluie à l'avant du front soit si restreinte en France, où la discontinuité de température est très prononcée. Mais il y a lieu d'admettre que la grande différence de température est limitée à une petite couche

¹ J. Bjerknes et H. Solberg: Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation. Geofysiske Publikationer, Vol. III, No. 1, Kristiania (1922), p. 13.

² J. Bjerknes et H. Solberg: l. c., p. 4 ff.

en contact avec le sol, les basses températures étant produites par la radiation nocturne, et que la différence soit, sinon effacée, du moins très faible, à partir d'une altitude de quelques centaines de mètres au-dessus du sol.

Une nouvelle zone de pluie, appartenant au second membre de la sixième famille, et indiquée par 6_{II}, s'étend à travers l'Ecosse; comme la discontinuité est très peu marquée, et, du reste, sans aucun intérêt pour notre problème, nous n'avons pas essayé de tracer la suite du front plus au sud.

Les conditions météorologiques de la Scandinavie dépendent toujours de la famille précédente, dont le dernier membre est indiqué par le minimum barométrique (*L*) dans la partie nord-est de la carte, et dont persistent encore dans la Bohême les restes d'une zone de pluie (front froid). Cette partie de l'Europe est, presque sans exception, caractérisée par du beau temps; c'est seulement sur le versant occidental de la chaîne de montagnes norvégienne, que des giboulées de neige, renforcées par l'orographie, persistent encore dans l'instable air polaire.

Les premiers nuages de la nouvelle famille sont en train de couvrir la partie sud-ouest de la Scandinavie, des nuages d'altitude moyenne, comme des alto-cumulus, étant observés au Jütland à une distance d'environ 300 à 400 km. du front, tandis que des cirrus et des cirro-stratus sont observés dans la Suède et la Norvège méridionale jusqu'à une distance d'environ 750 km. du front.

Par conséquent, il y a lieu d'admettre que les bandes de cirrus, photographiées à Oslo 2 à 3 heures plus tard dans la soirée, fassent partie de cette zone de cirrus, appartenant à la sixième famille. Cela paraît aussi résulter du fait que ces bandes, dirigées de N 50° W vers S 50° E, sont parallèles au front, celui-ci possédant cette même direction aux environs d'Aberdeen à 19^h du soir.

Mais avant d'en tirer un fait sûr, il faut d'abord considérer de plus près les observations faites à Oslo pendant la prise des photographes, concernant la forme et la structure des bandes et les phénomènes optiques, qui s'y rattachaient.

§ 8. Analyse des bandes de cirrus et des phénomènes optiques.

Une description des bandes, comme elles se sont présentées pendant leur passage au-dessus d'Oslo, a déjà été donnée auparavant (p. 4). Nous allons compléter cette description par quelques observations plus détaillées.

D'abord il a paru que les bandes qui, vues à l'œil nu, semblaient diffuses et sans aucune structure intérieure, possédaient tout de même une structure de cirro-cumulus. Car, observées au travers d'une lunette de Zeiss grossissant huit fois, les bandes, en apparence d'une constitution homogène, se sont divisées en petits flocons, pareils aux cirro-cumulus. Cet effet a surtout été très visible dans les nuages les plus éclairés par la lune. Comme les cirro-cumulus sont les derniers restes d'une couche de nuages, originellement compacte, qui est arrivée dans le stade de dissolution, due surtout à une descente, en entraînant une évaporation partielle des nuages, il semble en résulter que ces bandes de cirrus soient en train de descendre. A ce propos il est intéressant de rappeler la remarque faite à la page 6, et qui conduit aussi à l'adoption d'un mouvement descendant des bandes. D'autres indices peuvent s'interpréter dans le même sens; nous y reviendrons tout à l'heure.

D'abord il faut s'arrêter aux phénomènes optiques, observés autour de la lune dans différentes parties de la Norvège méridionale pendant la soirée du 28 janvier, d'après les communications des observateurs météorologiques.

A 19^h des phénomènes optiques ont été rapportés de la zone des cirrus entre Dalen dans le Telemarken (59°,5 L. N., 8° L. E. G.) et Vänersborg, au bord du grand lac suédois Vänern (58°,4 L. N., 12¹/₃° L. E. G.); plus tard ils ont été observés à Oslo. Ici, le phénomène le plus marqué était, autour de la lune, une double couronne faite d'une auréole d'une luminosité jaunâtre se terminant par un anneau brun rouge, auquel était fixée une couronne d'anneaux colorés, donnant les couleurs du spectre, comme ils ont commencé par le violet et se sont terminés par le rouge, après avoir passé par le vert vif. La luminosité en était très intense avec des couleurs brillantes et pures, comme on ne les voit que très rarement.

Deux mesures approximatives de la grandeur de la double couronne ont été prises à vue d'œil. La première, vers 22^h, a donné pour le diamètre de la double couronne une étendue angulaire d'environ 7°,6 (la distance entre α et β Persei), tandis que la seconde, effectuée une demi-heure plus tard, a donné pour le rayon de la double couronne l'angle 4°,4 (la distance entre ϵ et ζ Ursæ majoris). Par conséquent, la couronne a subi une augmentation dans l'espace de temps compris entre les deux observations. Le rayon de l'auréole, compté jusqu'à la terminaison du premier anneau rouge, était à peu près la moitié du rayon de la double couronne.

En observant les petits flocons de nuages au travers de la lunette de Zeiss il a été constaté qu'ils se déplaçaient à une grande vitesse dans la direction longitudinale des bandes, c'est-à-dire de N 50° W, parcourant ainsi le diamètre de la double couronne (7°,6) en 7—8 secondes, ce qui fait une vitesse d'un peu plus que 100 m. sec.⁻¹ C'est donc la tempête qui le jour précédent avait régné sur la Norvège méridionale dans les couches basses de l'atmosphère qui à ce moment se faisait sentir à cette grande altitude.

Il est d'un grand intérêt de pouvoir constater, que pendant ce temps-là il n'y avait, sauf les bandes de cirrus, pas de nuages dans le ciel; cela a été spécialement remarqué pendant la prise des photogrammes, et a aussi été constaté indépendamment à Oslo par un observateur météorologique M. Refsdal, chargé de la prévision quotidienne du temps à l'Institut Météorologique de Norvège. Cela paraît, du reste, être une nécessité, en concluant d'après les conditions météorologiques existantes; car, après un règne de plus de 24 heures d'un divergent courant d'air polaire, renforcé par l'effet du foehn sur le versant oriental de la chaîne de montagnes norvégienne, le contenu de vapeur d'eau doit être extrêmement petit dans la plus grande partie de la troposphère au-dessus d'Oslo.

Il faut donc conclure que la couronne a été produite par des particules, formant les bandes de cirrus à une altitude d'au moins 9,5 km.

D'après la théorie généralement admise, les couronnes seraient un phénomène de diffraction, produit par les petites particules dont sont composés les nuages. De plus il faut ajouter, car c'est une condition essentielle, que les nuages sont composés de particules homogènes ou presque homogènes, ce qui doit avoir pour conséquence que les couronnes se produisent surtout dans des nuages en dissolution, les petites particules évaporant par là les premières.

Quant à la constitution physique de ces particules on n'est pas encore arrivé à une solution tout-à-fait satisfaisante. Tandis qu'il est hors de doute que les petites gouttes d'eau, qui existent dans le brouillard et les nuages bas, possèdent cette propriété de diffraction, on n'a pas encore pu donner la preuve d'un tel effet, quand il s'agit des fines et légères aiguilles de glace, qui, selon la théorie généralement admise, forment le constituant prépondérant des nuages élevés, comme des cirrus. D'un autre côté, il a été observé plusieurs fois que des couronnes, et même des plus brillantes, se produisent dans de légères couches de cirro-cumulus ou de cirro-stratus. Mais, on n'a naturellement pas le droit de nier la possibilité de la présence de gouttes d'eau dans ces nuages, d'autant

plus qu'on n'est jamais parvenu à étudier de près la constitution d'un cirrus produisant une couronne.

Dans ces circonstances on a été amené à cette hypothèse, que les gouttes d'eau sont indispensables pour la formation des couronnes.

Les partisans de cette hypothèse ont cherché à repousser l'objection avoisinante, concernant l'existence possible de gouttes d'eau à une température aussi basse que celle de la région des cirrus, en mettant en évidence les analogies qui, selon leur opinion, doivent exister entre les conditions météorologiques de la région des cirrus et celles des régions glaciales de la terre. Des observations prises à ces derniers endroits ils ont, enfin, tiré des faits, qui semblent parler en faveur de leur hypothèse.

C'est ainsi qu'un arc-en-ciel blanc, qui se forme seulement dans des gouttes d'eau, a été observé par un temps brumeux et une température de -29° C. par M. G. C. Simpson¹ pendant son séjour à l'Antarctique comme membre de l'expédition de M. Scott, et par une température encore plus basse (-34° C.) au Groënland par M. A. Wegener².

Bien qu'il n'y ait aucune raison d'admettre que cette température soit la plus basse à laquelle les gouttes d'eau puissent exister dans l'atmosphère, on ne peut pas s'empêcher, toutefois, d'être impressionné par la grande différence entre ces températures observées et celles de la région des cirrus.

Quoi qu'il en soit, il y a d'ailleurs tant de divergences entre les deux masses d'air (citons à titre d'exemple les différences de pression et de vapeur d'eau), qu'il nous semble impossible d'impliquer les propriétés physiques de l'une à l'autre. Aussi les deux masses d'air sont elles d'origine très différente, et par conséquent de différente espèce, l'une étant composée de l'air tropique et l'autre de l'air polaire. Au moment de la formation des cirrus dans l'air tropique, celui-ci est assez récemment arrivé des régions tropicales, dont l'air est caractérisé par un riche contenu de noyau de condensation, de sorte qu'il y a lieu de croire que la concentration en soit plus grande dans l'air tropique que dans l'air polaire, devenu extrêmement pur pendant son long séjour dans les contrées désertes de l'Arctique et l'Antarctique. Or, il se peut que les noyaux de condensation soient d'une importance fondamentale, non seulement pour provoquer la condensation de la vapeur d'eau sursaturée, mais aussi pour en déterminer la forme, soit en celle d'aiguilles de glace soit en celle de gouttes d'eau surrefroidies.

On a aussi émis une autre objection contre l'hypothèse basée sur le fait qu'une couronne a parfois été vue sur le ciel en même temps qu'un halo. Les aiguilles de glaces étant indispensables à la formation des halos, il semble en résulter qu'elles puissent aussi produire des couronnes, mais non pas nécessairement, parce que dans tous les cas notés, d'ailleurs extrêmement rares, de la présence simultanée d'une couronne et d'un halo³, les observations ne semblent pas rejeter la possibilité de la présence de deux différentes couches de nuages, dont chacune aurait produit un phénomène optique isolé.

Mais, après tout, il y a tant d'objections sérieuses contre l'hypothèse énoncée, que pour le moment il nous semble nécessaire d'attribuer la propriété de diffraction aux aiguilles de glaces des cirrus.

Revenons maintenant au cas qui nous occupe.

D'après les formules de la météorologie optique on peut calculer le diamètre des particules produisant le phénomène de diffraction; il en résulte des valeurs de 0,018 et 0,015 mm. pour les deux observations, prises d'Oslo. Donc les particules composant

¹ George C. Simpson: *Coronæ and Iridescent Clouds*. Quart. Journ. Roy. Met. Soc. 38 (1912), p. 291.

² A. Wegener: *Frostübersättigung und Cirren*. Met. Zs. (1921).

³ D'après un mémoire de M. R. Meyer (Met. Zs. 1910) ce phénomène a été observé une cinquantaine de fois en tout, depuis le cas célèbre, observé par Newton le 19 février 1664; dans presque tous les cas la couronne a été peu développée, possédant un rayon de moins de 3° .

les bandes de cirrus sont en voie de décroissement, les particules les plus grandes arrivant les premières; ceci s'accorde avec le fait, déjà constaté dans ce qui précède, que les nuages étaient dans le stade de dissolution. Par ce procédé les petites particules s'évaporent les premières; il en résulte donc nécessairement que les premières bandes arrivées doivent aussi se composer des particules les plus grandes, à cause de ce qu'elles se trouvent naturellement dans le stade le plus avancé de dissolution.

Les bandes qui arrivèrent ensuite s'épaissirent peu à peu, l'effet de l'évaporation allant ainsi en diminuant; vers minuit les bandes étaient assez épaisses pour empêcher la lumière des étoiles de pénétrer, comme nous l'avons déjà constaté dans ce qui précède. A mesure que cet épaississement s'accomplit, la couronne s'affaiblit et les couleurs s'effacent; probablement qu'il y avait aussi à cela une cause secondaire, les particules qui composent les nuages étant alors trop peu homogènes pour produire un phénomène de diffraction pure.

Il importe de noter que pendant toute la soirée la couche de nuages était distinctement partagée en bandes, séparées par des intervalles tout à fait clairs, au travers desquels les étoiles brillaient avec une intensité lumineuse parfaite, comme on le voit sur les photographes. Mais cela ne dura pas ainsi toute la nuit. Vers minuit, une légère couche de cirro-stratus sans aucune structure intérieure voila la partie sud-ouest du ciel; recouvrant la lune, un halo d'un rayon de 22° parut (observé seulement à partir de $0^h 20^m$). La couronne, bien que faible, était aussi visible à ce moment. Cependant il n'y a pas de doute que les deux phénomènes se sont produits dans deux différentes couches de nuages, desquelles celle des cirro-stratus s'est montrée la plus basse, cachant les structures des bandes.

A ce propos il est intéressant d'examiner les variations de la pression atmosphérique à Oslo. L'invasion de l'air polaire avait été accompagnée d'une hausse barométrique, car la pression est allée en augmentant pendant toute la journée du 28 janvier pour atteindre son maximum à minuit. Les bandes n'exerçaient par conséquent aucune influence sur la pression, et ce n'est qu'au moment de l'apparition du voile de cirro-stratus, qu'une baisse de pression a commencé.

En comparant ces différentes observations de la structure et de la propriété optique des nuages en question il est possible d'en tirer des conclusions importantes quant à leur constitution et à leur origine.

Arrêtons-nous d'abord à la théorie de la formation de halos, qui est basée sur une réflexion et une réfraction des cristaux nuageux d'une légère couche de cirrus ou cirro-stratus. Cette condition est nécessaire, mais pourtant insuffisante, puisqu'on voit souvent de légers cirrus sans aucune trace de halo. Comme condition complémentaire on a proposé¹, que le contenu de vapeur d'eau des nuages produisant des halos (nuages cristallins) devrait correspondre exactement à une saturation par rapport à la glace, pendant que la propriété de réfraction serait supprimée par une sursaturation. Car une formation d'aspérités, comme on en voit dans les cristaux de neige, se produit à l'extérieur des formes cristallines. Mais tout cela est difficile à prouver.

Dans ce qui va suivre nous allons énoncer une autre hypothèse, basée sur la supposition plausible, que l'orientation des aiguilles de glace dans l'espace joue un grand rôle pour la formation de halos.

Dans la première phase de l'évolution d'un nuage de cirrus aussitôt après sa formation, aussi bien que dans la dernière phase avant son évaporation, les aiguilles de glace sont assez légères pour pouvoir se maintenir flottant dans la même couche d'air, se déplaçant alors à la même vitesse que la couche. Etant seulement exposées au mouvement tourbillonnaire très variable, qui toujours existe dans l'atmosphère, et même dans des proportions

¹ A. Wegener: Thermodynamik der Atmosphäre.

extrêmement grandes¹, les aiguilles doivent se placer d'une manière très irrégulière, et il n'y a pas de cause qu'une direction soit préférée à une autre. Mais cela se changera bientôt par suite d'une condensation persistante. Car, les aiguilles devenant alors de plus en plus lourdes, elles offrent d'une part plus de résistance aux oscillations tourbillonnaires, et d'autre part elles ne se maintiennent plus flottant dans la même couche, mais vont tomber en bas, même si l'on ne fait pas abstraction des courants ascendants, qui d'ordinaire existent dans les nuages. Comme des recherches récentes sur l'origine des cirrus ont démontré que ceux-ci pouvaient se former dans l'air chaud et humide au-dessus d'une surface-limite² (sans noter que cet air était monté directement de la surface de la terre), et comme on sait qu'une surface-limite entrave le développement complet du mouvement turbulent, il en résulte que l'effet de celui-ci sur les aiguilles tombantes devient très insignifiant.

De plus il est connu que les surfaces-limites séparent deux masses d'air d'un mouvement différent; mais comme il n'y a pas de discontinuité dans le sens mathématique, il suit de là que le changement de direction du vent ne s'accomplit pas momentanément, mais dans une couche de quelques centaines de mètres de largeur. Les cristaux, qui tombent lentement au travers de cette couche, sont donc exposés à un champ de force, provenant de la pression du vent, qui se change continuellement pour les particules, leur donnant ainsi une accélération de mouvement. Alors il est à priori probable, qu'il existe des directions préférées, dépendant du champ de force dans lesquelles les particules doivent se disposer. Cependant nous n'allons pas essayer pour cette fois d'en déterminer les valeurs exactes; car il nous faudrait avant tout pour cela de nouvelles recherches théoriques et expérimentales.

Donc il nous semble juste de diviser les cirrus en deux groupes suivant qu'une orientation des aiguilles ait lieu ou non. Les propriétés optiques des groupes étant évidemment différentes, il est naturel d'attribuer à l'une d'elles, celle possédant des aiguilles orientées à peu près dans la même direction, la propriété réfractive. Sans entrer dans des considérations mathématiques nous allons nous borner à présenter quelques faits, tirés des observations des nuages, et qui s'accordent avec cette hypothèse.

Premièrement, il doit exister une différence de structure entre les formes de cirrus produisant un halo et celles qui n'en donnent aucun. Car, les aiguilles nous cachant le plan inférieur de la couche de nuages d'où elles tombent, celui-ci nous paraîtra diffus et sans aucune structure marquée, ce qui s'accorde bien avec le fait connu depuis longtemps, que les halos les plus brillants se forment dans des cirro-stratus sans aucune structure.

De plus il suit de là que les cirrus ayant une structure prononcée, qui montre qu'alors les particules se tiennent flottantes, sont, ou bien dans la première phase de leur évolution, ou bien dans leur dernière phase. Or, on sait que quand arrivent les premiers indices d'un nouveau cyclone, les fibres de cirrus dessinées sur le ciel bleu, d'une façon faible quoique évidente, ne sont pas accompagnées d'un halo; ce n'est que quelque temps après, alors que les formes de structure ont presque disparu, que le halo paraît. De même les derniers restes de cirrus d'un cyclone en voie de disparition ne produisent jamais de halo, comme nous avons pu le constater pendant plusieurs années. Mais ils donnent souvent des couronnes autour de la lune, et il n'y a rien dans nos considérations qui s'oppose à cela. Car la formation d'une couronne dépend justement de la présence d'une

¹ H. Solberg: Sur le frottement dans les couches basses de l'atmosphère. Förh. skan. naturforskare-möte, Göteborg (1923).

² J. Bjerknes et H. Solberg: Meteorological Conditions for the Formation of Rain. Geofysiske Publikationer, Vol. II, No. 3, Kristiania (1921).

infinité d'aiguilles homogènes, au-dessous d'une certaine grandeur, et orientées dans toutes les directions.

Cette différence entre les vieux cirrus en voie de disparition et ceux qui se trouvent encore dans leur pleine évolution nous donne une explication naturelle du fait connu, que les halos ont une importance pronostique beaucoup plus grande que les cirrus. C'est de la sorte bien étonnant de constater avec quel degré de certitude les halos se produisent toujours dans les vrais fronts chauds.

Avant de retourner aux nuages du cas actuel pour en déterminer l'origine, nous allons considérer de plus près les conditions météorologiques de la partie supérieure de la troposphère, en nous bornant aux phénomènes qui soient d'intérêt ici.

On sait que cette partie de l'atmosphère est d'une structure foliacée, étant divisée en plusieurs couches, séparées par des surfaces-limites. Il suit de là que ces surfaces servent de surfaces de glissement quand un mouvement ascendant commence dans la troposphère, comme il va arriver à l'avant d'un cyclone, l'air potentiellement plus chaud au-dessus des surfaces montant par rapport à l'air potentiellement plus froid au-dessous, et pouvant ainsi provoquer une formation de nuages hauts. Ce mouvement ascendant va même continuer quand le cyclone lui-même est arrivé dans le stade d'occlusion, le secteur chaud ayant disparu de la surface de la terre. A partir de ce moment le mouvement du cyclone se ralentit, tandis que les nuages hauts continuent leur marche comme les nuages d'un front supérieur, en avant du cyclone en voie de disparition. Arrivés dans le domaine de l'anticyclone précédent, ils y sont exposés à l'influence desséchante de l'air sec, aussi bien qu'au mouvement descendant qui y règne, de sorte qu'ils commencent bientôt à se vaporiser. Comme un mouvement ondulatoire dans leur surface-limite (ondes d'Helmholtz) a pour conséquence que cette évaporation n'exerce pas la même influence sur toute la masse, c'est dans les vallées des vagues que les premières fentes paraissent dans cette couche de nuages, originairement compacte. On est ainsi amené à croire que les nuages, dans un stade plus avancé de dissolution, deviennent ce qu'on appelle généralement des bandes de cirrus, et celles-ci peuvent par conséquent être les derniers restes de cyclones dissous. De l'étude précédente concernant les propriétés optiques de ces vieux nuages, il suit qu'ils sont capables de produire une couronne, mais non pas un halo.

Quant à l'altitude de ces nuages, il faut d'abord remarquer, que beaucoup porte à croire que l'air tropique atteint son altitude maximum au-dessus des cyclones dissous. Car le mouvement ascendant persiste nécessairement en haut tant qu'une transformation d'énergie a lieu, et l'énergie potentielle des masses d'air tropique n'est épuisée dans la partie supérieure de la troposphère que longtemps après l'occlusion du cyclone. Les bandes de cirrus et mieux encore les nuages de forme compacte, dont proviennent les bandes par une dissolution, doivent par conséquent se former dans le niveau le plus haut, jusqu'où l'air tropique peut pénétrer. Cela se prouve par les mesures photogrammétriques de Potsdam. Car, abstraction faite d'une forme de cirrus qui se produit comme une légère couche nébuleuse aux limites supérieures de la troposphère et d'une autre forme qui est produite par les variations de l'altitude de la troposphère — elle possède exactement la même période annuelle d'altitude que celle-ci —, les plus hautes formes des cirrus restants — ou des cirrus de dépression — sont les couvertures de cirrus et les bandes de cirrus. La dernière forme étant sans doute une forme dégénérée de la première, et se trouvant aussi en moyenne à 50 m. plus bas que celle-ci, la supposition se trouve prouvée.

Comme les variations d'altitude de la troposphère proviennent surtout des mouvements presque horizontaux des masses d'air tropique et polaire, il suit de là qu'à un endroit donné, cette altitude doit atteindre sa valeur maximum au-dessus des cyclones dissous. Il est évident que la dissolution ne doit pas être trop avancée, pour qu'un mouvement descendant des nuages hauts n'ait pas déjà commencé.

Ayant ainsi mis en lumière quelques questions concernant l'origine des nuages hauts, nous pouvons maintenant revenir au cas qui nous occupe.

D'après ce qui précède il va de soi que les bandes de cirrus photographiées doivent être considérées comme les derniers restes nuageux d'un cyclone dissout, qui quelques jours auparavant, au-dessus de l'Atlantique, avait été le premier membre de la sixième famille, mais qui depuis a disparu de la surface de la terre, absorbé peut-être par le membre cyclonique succédant ζ_1 , qui s'est propagé plus rapidement. Seuls ces nuages hauts ont pu continuer la marche en avant des cirro-stratus du cyclone suivant. Bien que celui-ci fut aussi dans le stade d'occlusion, une transformation d'énergie a tout de même eu lieu à son ancien front chaud dans la région des cirro-stratus, comme le prouve la baisse de pression à Oslo. Le mouvement ascendant a provoqué une formation continue d'aiguilles de glace, qui en tombant nous ont paru avoir la forme d'un fin voile nuageux sans aucune structure et ayant de même provoqué le halo observé.

Maintenant il n'y a plus rien d'étonnant à ce que l'altitude des bandes fut aussi grande que 9,5 km.; car, d'après l'étude précédente, nous savons que les bandes aussi bien que la troposphère doivent atteindre leur plus grande altitude dans la situation météorologique actuellement existente.

Les événements météorologiques de la soirée portent aussi à croire que la conception soutenue dans ce qui précède, que les couronnes se forment bien dans des aiguilles de glace, doit être près de la vérité. Car, le voile de cirro-stratus du cyclone ζ_1 étant composé d'aiguilles de glace, il nous semble difficile de maintenir l'opinion que les bandes, situées dans un niveau plus haut, soient composées de gouttes d'eau.

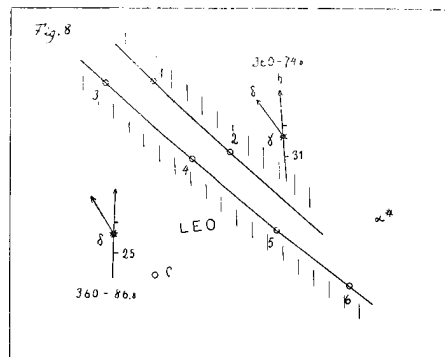
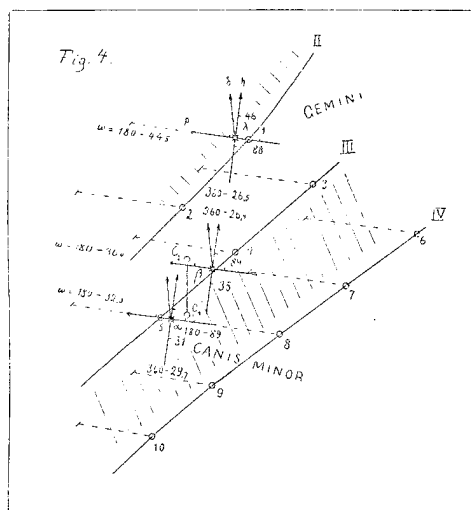
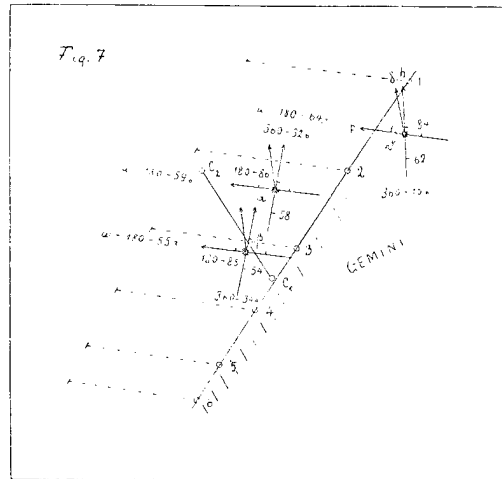
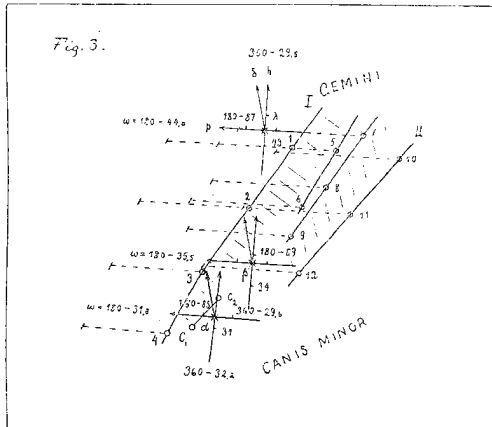
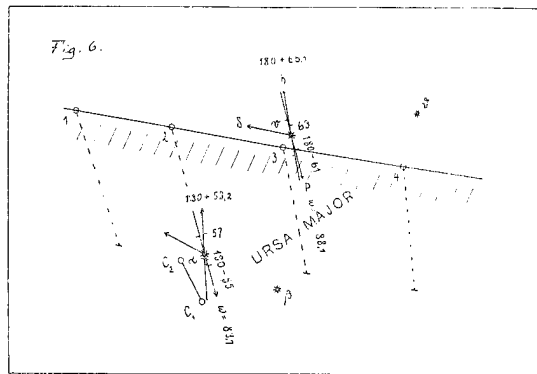
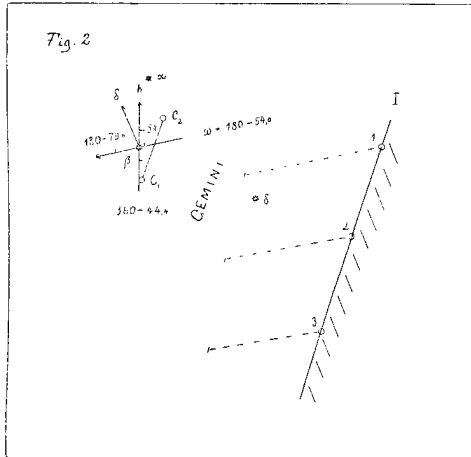
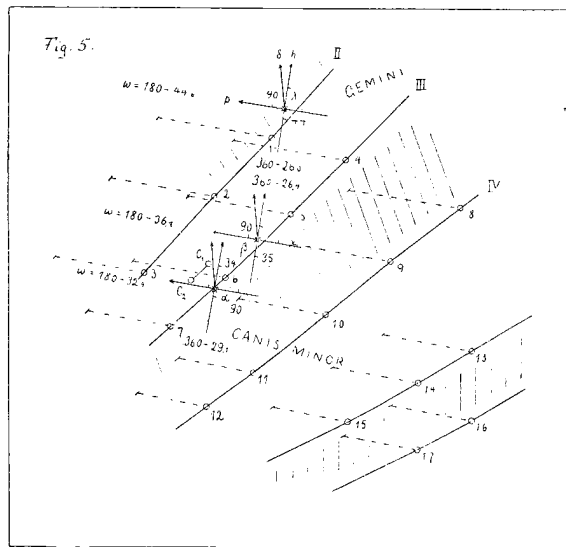
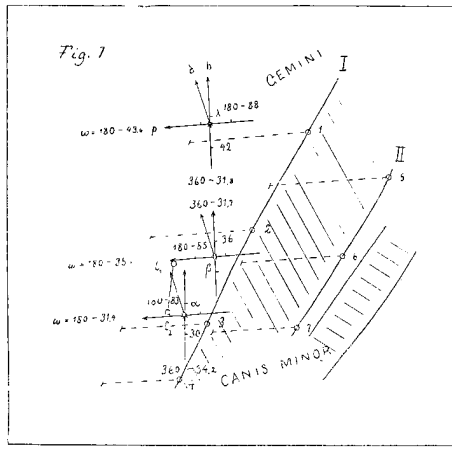
Par la mesure d'une série de photogrammes de bandes de cirrus nous sommes donc arrivés à des résultats, qui peut-être sont d'une certaine utilité pour formuler les idées concernant les conditions météorologiques de la partie supérieure de la troposphère. Comme la plupart des problèmes qui s'y rapportent attendent toujours leur solution définitive, ce petit essai devra probablement éveiller un peu d'intérêt. Mais les photogrammes n'étant pris qu'à titre d'exemple d'une méthode qui pourrait servir à la mesure de nuages, sans avoir trait aux problèmes météorologiques de la haute troposphère, nous désirons souligner que les conclusions ne sont présentées qu'à titre préliminaire. Nous espérons cependant pouvoir donner plus tard un autre exemple d'un intérêt météorologique plus grand et étudier de plus près le mouvement ondulatoire par la prise d'une série de photogrammes d'un même nuage pendant son parcours à travers le ciel. Une comparaison avec d'autres photogrammes simultanés, pris dans le but de déterminer la vraie inclinaison de la surface-limite, donnerait probablement des résultats d'un grand intérêt pour la météorologie dynamique.

Appendice. Des photogrammes de nuages hauts ont aussi été pris à différentes reprises plus tard. La méthode photogrammétrique doit mieux réussir pendant la nuit que par la lumière intense du grand jour, les photographies ayant alors plus de contrastes; on peut le constater en regardant la figure 22, planche II, qui donne la reproduction d'une photographie d'un halo autour de la lune, prise à Bygdø vers minuit le 6 janvier 1925, à 23^h 36^m.

EXPLICATIONS DES FIGURES

- Fig. 1. Dessin du photogramme no. 1 pris à 21h 28m 44s.
 Fig. 2. — — — no. 2 — 21h 34m 39s.
 Fig. 3. — — — no. 3 — 21h 35m 44s.
 Fig. 4. — — — no. 4 — 21h 44m 49s.
 Fig. 5. — — — no. 5 — 21h 46m 24s.
 Fig. 6. — — — no. 6 — 21h 48m 29s.
 Fig. 7. — — — no. 7 — 22h 3m 14s.
 Fig. 8. Dessin de la photographie prise à 22h 4m 54s.
 Fig. 9. — — — — 22h 6m 14s.
 Fig. 10. — — — — 23h 40m 24s.
 Fig. 11. — — — — 23h 41m 14s.
 Fig. 12. Carte montrant la situation des nuages sur les photogrammes no. 1, 2 et 3. La base (B—O) est marquée.
 Fig. 13. Carte montrant la situation des nuages sur les photogrammes 5, 6 et 7. La base est marquée.
 Fig. 14. Carte montrant la situation des nuages sur les photographies prises de 22h 4m 54s à 23h 41m 14s.
 Fig. 15. [Carte synoptique du temps le soir du 28 janvier, à 19h T.M.E.C. (7h du soir).
 Fig. 16 et 17. Photogramme no. 3. La fig. 16 représente la photographie prise à l'Observatoire, la fig. 17 celle prise à Bygdø. Le pointage des objectifs n'est pas tout-à-fait en ordre, de sorte que les étoiles sont de petits cercles au lieu d'être des points.
 Fig. 18 et 19. Photogramme no. 5. La fig. 18 représente la photographie prise à l'Observatoire, la fig. 19 celle prise à Bygdø. Même remarque relativement au pointage.
 Fig. 20. Photographie prise à Bygdø à 23h 40m 24s.
 Fig. 21. Photographie prise à Bygdø à 23h 41m 14s.
 Fig. 22. Photographie d'un halo autour de la lune qui est cachée derrière une maison, le 6 janvier 1925, à 23h 36m. Vers le bas on peut distinguer les étoiles de la constellation d'Orion.
-





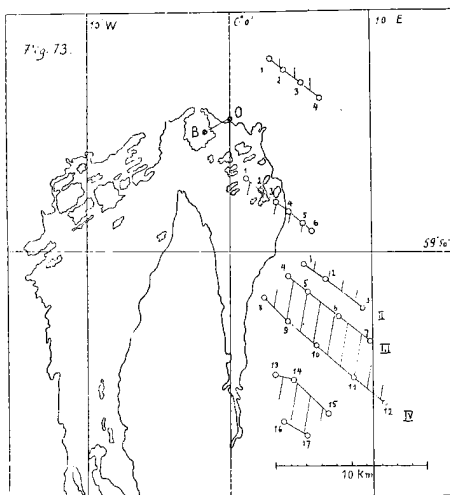
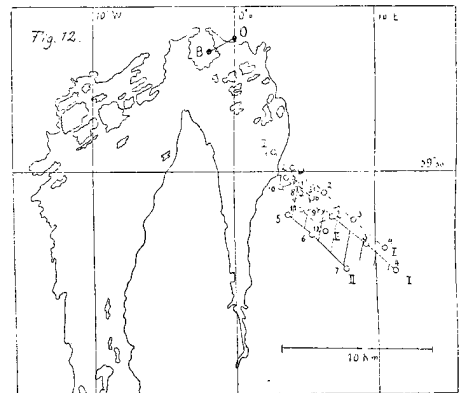
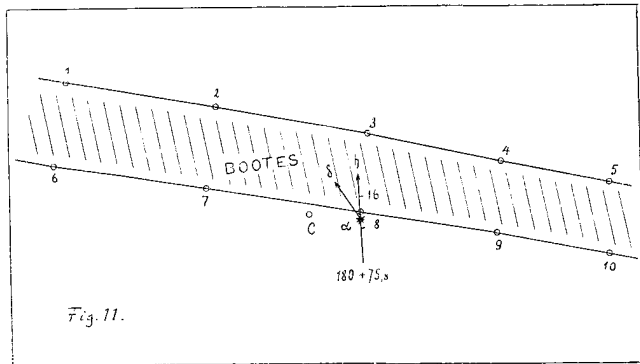
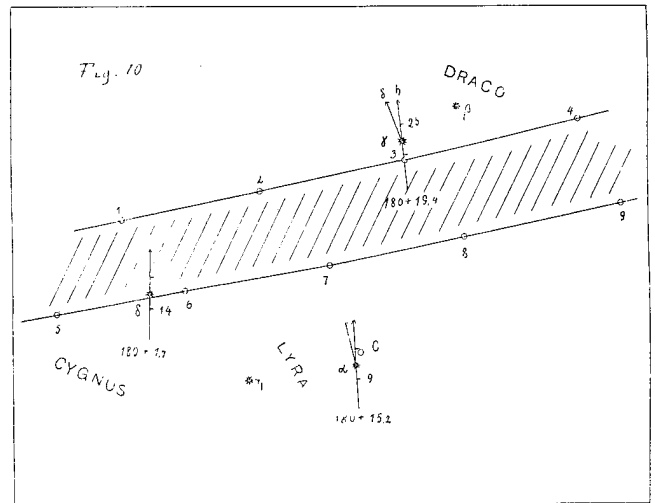
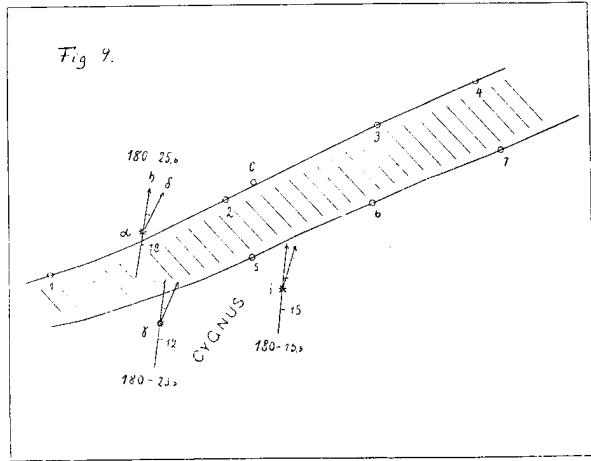


Fig. 22

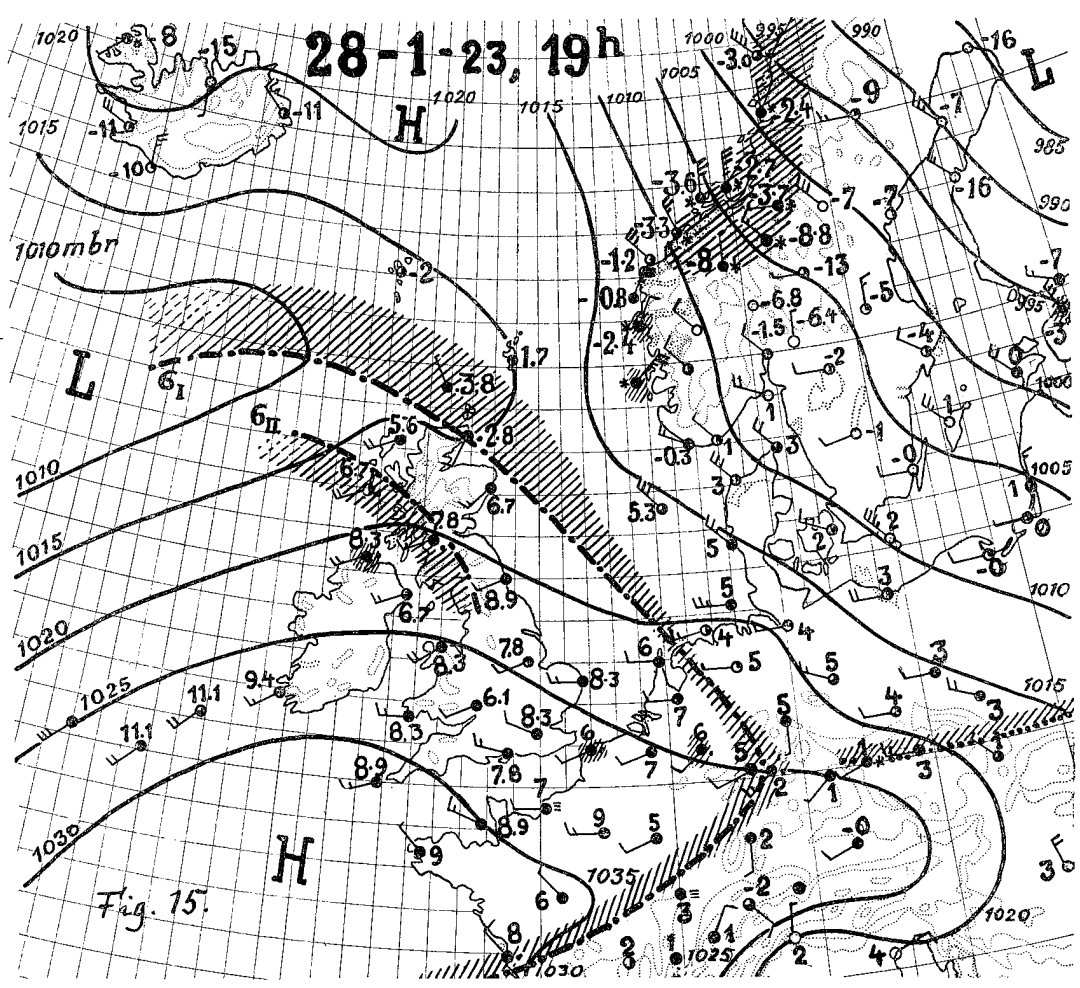
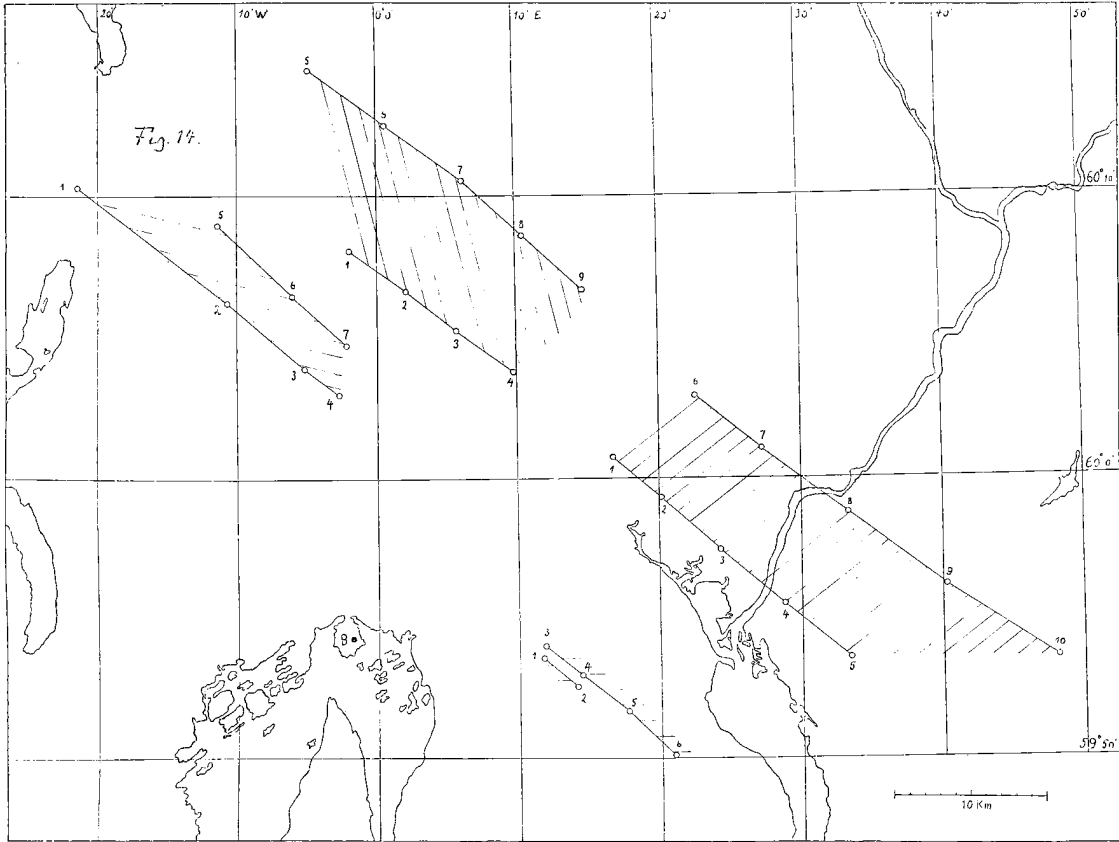




Fig. 16

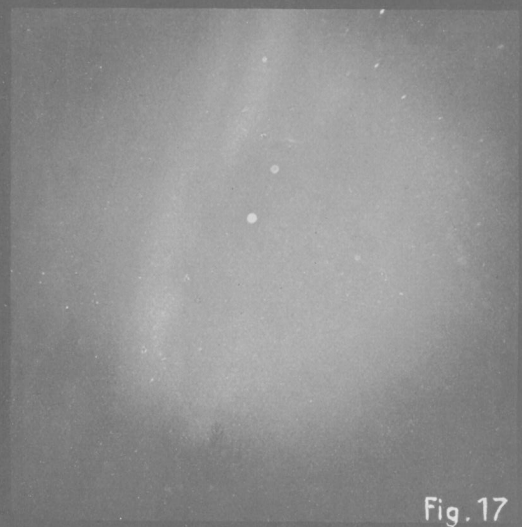


Fig. 17



Fig. 18



Fig. 19



Fig. 20



Fig. 21