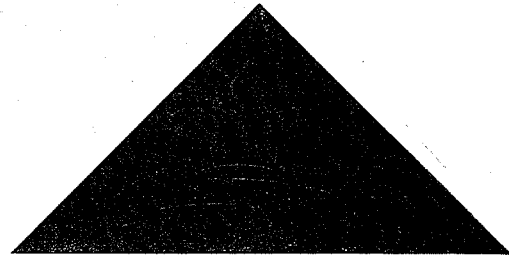
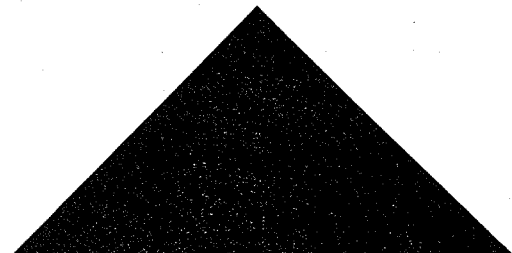


L'ÉVOLUTION DE LA NEIGE DÉPOSÉE A MOYENNE ALTITUDE



PAR A. POGGI *



Sommaire

introduction.

1. Accumulation du stock neigeux.

1.1. Mesure des précipitations.

- 1.1.1. Description des différents types d'appareils.
- 1.1.2. Dispositifs de mesure employés.
- 1.1.3. Résultats.
- 1.1.4. Examen des résultats.

1.2. Masse spécifique et équivalent en eau de la couche de neige.

- 1.2.1. Description des appareils et procédés de mesure.
- 1.2.2. Dispositif utilisé.
- 1.2.3. Résultats des mesures.
- 1.2.4. Examen des résultats.

2. Régime thermique de la neige.

2.1. Fusion.

- 2.1.1. Description des appareils.
- 2.1.2. Dispositif utilisé.
- 2.1.3. Résultats des mesures.

2.2. Température et transfert de chaleur.

- 2.2.1. Description du dispositif de mesure.
- 2.2.2. Résultats des mesures.

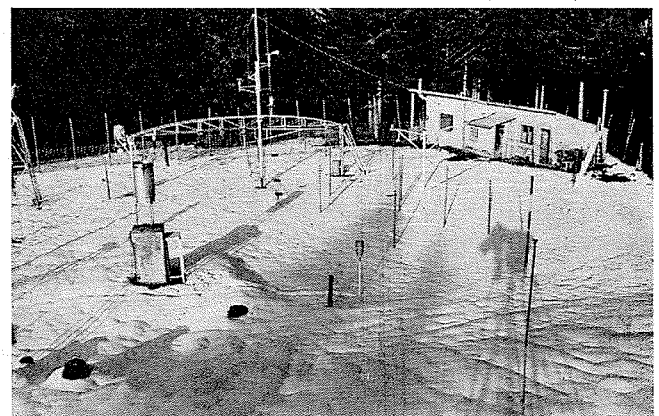
3. Conclusion.

3.1. Evolution du stock.

- 3.1.1. Hiver 1960-1961.
- 3.1.2. Hiver 1961-1962.
- 3.1.3. Hiver 1962-1963.

3.2. Régime thermique.

- 3.2.1. Propagation d'une onde de froid.
- 3.2.2. Coefficient de conductibilité thermique.
- 3.2.3. Stock de frigories.
- 3.2.4. Température minimale de la surface de la neige.



Vue générale du Laboratoire du Col de Porte.
General view of the Col de Porte Laboratory.

* Docteur-Ingénieur.

Introduction

Le remplissage des bassins assurant l'alimentation des usines hydroélectriques, les dégâts occasionnés par les avalanches suffisent à justifier, sur le plan pratique, l'étude de la neige, indépendamment de son intérêt théorique. Je n'ai pas la prétention d'aborder tous les problèmes posés par l'étude de ce matériau, ni même de donner des résultats définitifs. Plus modestement, je me suis limité à présenter une partie des mesures recueillies au cours de trois ans d'exploitation de la station nivométrique du col de Porte, dans le massif de la Chartreuse. Malgré sa faible altitude (1 350 m) cette station bénéficie d'un enneigement abondant (de 150 à 180 cm en année normale, près de 300 cm en 1962-1963). Cette réalisation est le résultat d'une étroite collaboration de la Météorologie Nationale, des Eaux et Forêts, et de la Division Technique Générale d'Electricité de France.

Il convient, je crois, d'insister sur les difficultés de toutes sortes qui viennent compliquer un travail souvent ingrat.

Les instruments classiques utilisés pour les besoins courants de l'exploitation ne sont, en général, pas adaptés aux besoins de la micrométéorologie. Leurs dimensions sont souvent trop grandes, leur sensibilité et leur précision, parfois très insuffisantes. Il arrive qu'il n'existe pas d'appareil, il faut alors le construire, ce qui demande du temps et de l'argent. Les conditions d'utilisation du matériel sont dures et la défaillance d'un instrument au cours d'un hiver se traduit en général par un an de retard.

En plus des difficultés inhérentes aux mesures dans la nature, s'ajoutent celles qui sont propres à ce matériau.

C'est ainsi que la mesure de la température de la surface de la neige n'a pu être obtenue jusqu'à présent d'une façon continue. La protection du capteur contre le rayonnement, et la nécessité d'un bon contact thermique entre la neige et le corps thermométrique, sont difficiles à réaliser sans perturber cette surface.

La mesure des gradients verticaux de température par des thermo-couples nécessite l'utilisation d'un potentiomètre enregistreur qui fonctionne sans arrêt pendant 5 à 6 mois. Les enregistrements qui, pour l'ensemble de toutes les mesures, représentent plusieurs kilomètres de papier par an, sont d'un dépouillement long et délicat.

Les supports des appareils introduisent des perturbations notables, soit en modifiant l'accumulation, soit en provoquant la formation de cratères.

Cette liste pourrait s'allonger indéfiniment, mais les exemples cités sont suffisants pour expliquer que, sur trois ans de mesure, on ne dispose parfois, pour certains paramètres, que d'une seule série.

Quoi qu'il en soit, les résultats obtenus sont encourageants. Ils le sont d'autant plus que l'appareillage utilisé jusqu'en 1963 est nettement périmé. De nouveaux prototypes déjà réalisés nous permettent d'espérer d'excellents résultats. Ces appareils de très petites dimensions, sont pourvus d'une chaîne de comptage et d'un intégrateur électronique, et permettent d'obtenir une valeur moyenne sur un intervalle de temps fixé par l'utilisateur. Le

procédé d'enregistrement facilite grandement l'exploitation des résultats. Ces appareils en cours de fabrication équiperont cette année les laboratoires de nivologie dépendant du Laboratoire de Glaciologie Alpine du C.N.R.S.

Le mémoire comprend deux parties :

- la première traite de l'accumulation du stock neigeux et contient deux chapitres consacrés à la mesure des précipitations, de la masse volumique et de l'équivalent en eau;
- la seconde expose quelques résultats sur le régime thermique de la neige. Après avoir étudié la fusion, j'ai présenté les divers modes possibles pour décrire le régime thermique, j'ai essayé d'établir quelques bilans et de calculer l'ordre de grandeur de la conductibilité thermique de la neige. Les résultats obtenus sont du même ordre que les valeurs généralement admises.

1. Accumulation du stock neigeux

1.1. Mesure des précipitations.

1.1.1. DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS :

La gamme des appareils de mesure des précipitations paraît suffisamment étendue pour qu'on puisse espérer trouver un instrument adapté à chaque situation. Trois ans d'utilisation des divers types d'appareils ont prouvé le contraire : aucun pluviomètre ou pluviographe ne permet une mesure sûre des précipitations neigeuses, et les valeurs obtenues ne sont que des approximations plus ou moins grossières.

Nous nous proposons, tout d'abord, de donner une description succincte des divers instruments en précisant, dans la mesure du possible, leurs défauts et leurs qualités.

a) Le pluviomètre du type « Association » est suffisamment connu pour qu'il soit inutile de le décrire. Sa profondeur, légèrement supérieure à celle des appareils classiques, est de l'ordre de 370 mm; l'aire de la surface de réception est égale à 400 cm².

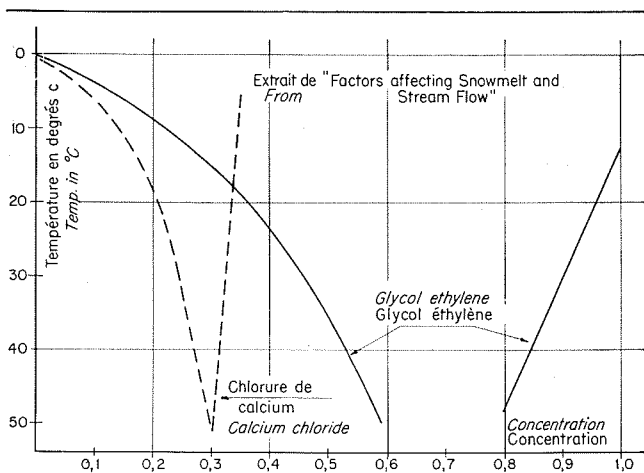
L'utilisation d'un tel appareil implique la présence d'un observateur et ne permet en outre d'obtenir qu'une valeur intégrée sur un intervalle de temps donné, en général de l'ordre de 24 h.

b) Dans le cas de chutes importantes, la capacité du seau peut se montrer insuffisante; et c'est pourquoi nous avons réalisé des pluviomètres en afcodur d'un diamètre de l'ordre de 10 cm et de 80 cm de haut; ces récipients sont directement déposés à la surface de la neige. Une chute intense de neige mouillée risque toutefois de provoquer la formation d'un bouchon qui limite la section d'entrée, ou même l'obture complètement.

c) Le nivo-pluviomètre totalisateur se compose d'un bidon cylindrique à fond hémisphérique de 1 080 mm de profondeur. La section d'entrée de 200 cm² est protégée par un cône de Nipher. Un pylône de 4 m de haut supporte l'ensemble.

Dans la partie cylindrique, une variation de niveau de 1 mm correspond à une lame de précipitation de 10 mm.

Dans la partie hémisphérique, une courbe de



1/ Température de congélation du chlorure de calcium et du glycol.
Freezing points of calcium chloride and glycol.

charge permet d'établir la correspondance entre la hauteur mouillée et la lame de précipitation.

Malgré la présence d'une solution de chlorure de calcium, on constate que le mélange gèle en surface pour des températures de l'ordre de -7°C .

En effet, il est probable que l'eau provenant de la fonte de la neige reste en surface et diminue la concentration superficielle du CaCl_2 . La neige recueillie s'accumule sur la couche de glace et peut s'évaporer partiellement avant d'avoir pu fondre. Toute mesure est impossible aussi longtemps que persiste cet état.

La figure 1 donne le point de congélation du CaCl_2 et du glycol en fonction de la concentration.

Malgré ses défauts, cet appareil, d'une extrême simplicité, nous paraît être le mieux adapté à la mesure des précipitations neigeuses.

L'utilisation du glycol ne paraît pas résoudre le problème du gel en surface. Nous avons, en effet, constaté la formation soit d'une couche de glace superficielle, soit d'un mélange plus ou moins visqueux. Si l'intensité de la chute est grande, la neige s'accumule sur cette couche.

d) L'intérêt des nivopluviographes réside dans l'enregistrement continu du phénomène.

Le nivopluviographe chauffant à augets basculeurs se compose d'un cône de réception à double paroi, rempli de mazout, d'un mécanisme de mesure à augets basculeurs permettant l'enregistrement soit sur un tambour cylindrique, soit à distance par impulsions électriques, et enfin d'un système de chauffage,

L'inconvénient d'un tel appareil réside d'une part dans la nécessité de procéder à la fusion préalable de la neige, ce qui provoque une certaine perte par évaporation, et d'autre part, dans l'existence d'un temps de basculement non négligeable, qui se traduit par un détarage en fonction du débit.

La Division Technique Générale (Service de la Production Hydraulique d'E.D.F.) s'est efforcée d'améliorer le dispositif de chauffage et de limiter les pertes par évaporation. Un prototype en cours d'expérimentation est équipé d'un cône à paroi simple dont l'angle au sommet est faible. Les parois étant très inclinées, l'eau s'écoule rapidement vers l'orifice. Des résistances électriques commandées

par un thermostat fixé sur l'entonnoir et un ventilateur assurent le chauffage du cône.

e) Nous employons également un appareil d'origine américaine. Il se compose d'un seau placé sur le plateau d'un dynamomètre enregistreur. La section d'entrée est de l'ordre de 325 cm^2 . L'appareil pèse la neige contenue dans le seau, dont la capacité correspond à une lame de 300 mm . Le style a une course de 150 mm et peut se déplacer verticalement dans les deux sens. La sensibilité est de l'ordre du millimètre.

Les inconvénients de cet enregistreur sont de deux sortes : d'une part une chute de neige importante est capable de provoquer la formation d'un bouchon, et d'autre part, l'appareil est très sensible aux variations de pression provoquées par le déplacement de l'air au niveau de la section d'entrée.

f) Un troisième type d'appareil, le pluviographe de Hellmann, a été expérimenté. Son emploi a été rapidement abandonné.

1.1.2. DISPOSITIFS DE MESURE EMPLOYÉS :

Au cours de l'hiver 1960-1961 nous avons employé un pluviographe à auget basculeur désigné sous la référence P_1 . Cet appareil était équipé d'un cône à double paroi et à faible pente, et chauffé par trois résistances électriques à ailettes placées sous l'entonnoir. La température était contrôlée par un thermostat d'ambiance. En cours de saison, nous avons expérimenté un pluviographe à dynamomètre Bendix désigné sous la référence B, et un pluviographe de Hellmann désigné sous la référence H. Nous disposons également d'un nivopluviomètre totalisateur désigné sous la référence T_1 .

Au cours de l'hiver 1961-1962, nous disposions des mêmes appareils, mais le mécanisme du pluviographe P_1 a été changé. En outre, nous avons renoncé à utiliser le pluviographe de Hellmann.

Pour la saison 1962-1963, nous avons complété le dispositif par un second pluviographe à auget (P_2), qui a été mis en service en janvier. Il était équipé d'un cône à doubles parois rempli de pétrole et à forte pente; le chauffage électrique était contrôlé par un thermostat noyé dans le bain de pétrole. Un second totalisateur (T_2) fut implanté à 30 m environ au nord du précédent. Deux pluviomètres « Association » furent placés l'un sur une passerelle à 4 m environ au-dessus du sol, et l'autre (A_2) à 15 m environ au sud du précédent sur un support télescopique.

1.1.3. RÉSULTATS :

Nous nous proposons de donner les résultats bruts fournis par les divers appareils, puis les valeurs définitives qui nous paraissent les plus vraisemblables.

1.1.3.1. Hiver 1960-1961 :

La période d'enneigement continu débute le 27 novembre 1960 et se termine aux environs du 11 avril 1961. On distingue les phases d'accumulation et de disparition, qui s'étendent respectivement du 27 novembre 1960 au 10 mars 1961, et du 10 mars 1961 au 11 avril 1961.

Le tableau 1 contient les valeurs des précipitations recueillies par les divers appareils.

Tableau 1

PÉRIODE	P ₁ (mm)	T ₁ (mm)
27-11-60 au 11-4-61	500	740
27-11-60 au 10-3-61	465	700
10- 3-61 au 11-4-61	35	40

Tableau 2

PÉRIODE	P ₁ (mm)	B (mm)	T ₁ (mm)
10-1-62 au 5-5-62	716	751	895
10-1-62 au 16-4-62	664	697	846
16-4-62 au 5-5-62	52	54	49

Tableau 3

PÉRIODE	A ₁ (mm)	A ₂ (mm)	P ₁ (mm)	P ₂ (mm)	B (mm)	T ₁ (mm)	T ₂ (mm)
13-11-62 au 14-5-63	1 253	1 277	1 110	1 174	1 235	1 460	1 445
13-11-62 au 11-4-63	1 101	1 125	958	1 014	1 094	1 331	1 326
11- 4-63 au 14-5-63	152	152	152	160	131	129	119

Tableau 4

DATE	P ₁ (mm)	B (mm)	H (mm)	CARACTÈRE : p = pluvieux
18-3-61	14,7	14,0	14,7	p
19-3-61	6,5	3,0	3,7	p
31-3-61	5,0	6,0	5,3	p
3-4-61	0,4	0	0,4	p
14-4-61	8,5	8,5	arrêt	p
15-4-61	5,5	7,5		p
16-4-61	7,4	5,0		p
17-4-61	9,4	11,0		p
18-4-61	1,1	1,0		p
25-3 au 27-4-61	41,2	41,0		p
28-3 au 30-4-61	15,9	17,0		p
TOTAL	115,6	114,0		p

Tableau 6

PÉRIODE	P ₁ (mm)	T ₁ (mm)
du 1 ^{er} au 20 octobre 1961	190	185
du 1 ^{er} au 30 octobre 1961	255,7	255

Tableau 7

PÉRIODE	P ₁ (mm)	B (mm)	T ₁ (mm)	CARACTÈRE :	
				p = pluie pn = pluvio-neigeux	n = neige
6-1-62 au 15-1-62	110	110	145	pn	p 50 %
15-1-62 au 26-1-62	41	44	48	n	
26-1-62 au 8-2-62	24	28	28	pn	p 50 %
8-2-62 au 17-2-62	97	103	128	n	
17-2-62 au 28-2-62	32	21	61	n	
28-2-62 au 5-3-62	37	49	45	pn	quelques % de p
5-3-62 au 14-3-62	36	46	57	pn	quelques % de p
14-3-62 au 28-3-62	73	74	90	n	
28-3-62 au 30-3-62	73	82	86	p	
30-3-62 au 2-4-62	22	17	30	p	
2-4-62 au 4-4-62	26	25	39	n	
4-4-62 au 5-4-62	26	27	12	pn	
5-4-62 au 9-4-62	48	52	47	n	
9-4-62 au 11-4-62	9	6	9	n	
11-4-62 au 15-4-62	10	11	16	n	
6-1-62 au 15-4-62	664	697	846		

Tableau 5

PÉRIODE	P ₁ (mm)	B (mm)	T ₁ (mm)	CARACTÈRE :
				p = pluie pn = pluvio- neigeux
31-10-61 au 10-11-61	80		89	pn neige 20 %
10-11-61 au 29-11-61	33		36	p
29-11-61 au 6-12-61	120	127	97	pn neige 12 %
6-12-61 au 12-12-61	162	156	188	pn neige 36 %
12-12-61 au 29-12-61	20	20	20	pn
29-12-61 au 6- 1-62	29	36	45	pn
31-10-61 au 6- 1-62	444		475	
29-11-61 au 6- 1-62	331	339	350	

1.3.2. Hiver 1961-1962 :

La période d'enneigement continu débute le 10 janvier 1962 et se poursuit jusqu'au 4 mai 1962. Les phases d'accumulation et de disparition s'étendent respectivement du 10 janvier au 16 avril 1962 et du 16 avril au 4 mai 1962..

Le tableau 2 donne les valeurs des précipitations recueillies au cours de ces différentes périodes.

1.1.3.3. Hiver 1962-1963 :

La période d'enneigement continu s'étend du 13 novembre au 14 mai. Les phases d'accumulation et de disparition couvrent respectivement les périodes du 13 novembre au 11 avril et du 11 avril au 14 mai.

Le tableau 3 contient les valeurs des précipitations au cours de ces périodes.

1.1.4. EXAMEN DES RÉSULTATS :

Les tableaux ci-dessus mettent en évidence l'incertitude attachée aux mesures des précipitations. Une étude comparative des performances des divers instruments utilisés d'octobre 1960 à mai 1962 nous a permis de dégager les quelques conclusions suivantes : si les précipitations ont un caractère pluvieux, le pluviographe à auget, le pluviographe à dynamomètre et le totalisateur donnent des résultats comparables. Du 15 avril 1962 au 29 juin le pluviographe à auget reçoit 212 mm de pluie et le totalisateur 215. Mais il arrive aussi que les indications du totalisateur, dans ce cas, soient inférieures à celles du pluviographe.

Du 18 mars 1961 au 30 avril 1961, les précipitations présentent un caractère pluvieux. Le tableau 4 indique les précipitations en 24 h recueillies par le pluviographe à augets (P_1), le pluviographe à dynamomètre (B) et le pluviographe de Hellmann (H).

L'écart entre les deux valeurs totales est négligeable. Au cours de cette expérience, le pluviographe B était placé sur le pylône du totalisateur T_1 .

Nous avons pensé que l'écart observé entre les mesures de P_1 et de T_1 du 6 décembre 1960 au 9 mars 1961 :

$$|R_1| = \frac{\Sigma P_1 - \Sigma T_1}{\Sigma T_1} = -32,5 \%$$

pouvait s'expliquer d'une part par l'évaporation au niveau de l'entonnoir de P_1 , et d'autre part et surtout par les différences de situations et de hauteurs des deux appareils, distants d'une quinzaine de mètres et placés l'un à plus de 4 m et l'autre à environ 3 m du sol. L'expérience réalisée a montré que cette hypothèse n'était pas vérifiée, tout au moins pour des précipitations liquides.

Les résultats inclus dans le tableau 5 concernent une période à caractère pluvio-neigeux (*p.n.*).

On constate que l'écart entre les mesures P_1 et B reste faible, de l'ordre de 2 à 3 % ; de même, R_1 reste compris en valeur absolue entre 5,5 et 6,5 % ; il n'y a donc aucune comparaison avec la valeur précédente de $|R_1|$, qui était de 32,5 %.

Il convient de préciser que, bien nous n'ayons pu mettre en évidence un fonctionnement défectueux du mécanisme de mesure à augets du pluviographe P_1 au cours de l'hiver 1960-1961, nous avons procédé ultérieurement à son remplacement par un appareil identique.

Du 10 octobre 1961 au 31 octobre 1961, les précipitations tombent sous forme de pluie, avec toutefois quelques chutes de neige mouillée. Le tableau 6 ne fait pas apparaître d'écarts importants entre les mesures P_1 et T_1 .

Au cours de la période du 6 janvier 1962 au 15 avril 1962, les précipitations (tableau 7), ont un caractère pluvio-neigeux avec une dominante neigeuse.

On constate un écart de l'ordre de 5 % entre les mesures de P_1 et B qui peut s'expliquer par l'évaporation de la neige dans l'entonnoir de P_1 . On a $|R_1| = 21,5 \%$.

En résumé nous avons :

1. Pour des précipitations à caractère pluvieux

ou pluvio-neigeux, mais avec une dominante pluvieuse et de la neige mouillée :

$$R_1 \approx 0$$

2. Pour des précipitations à caractère pluvio-neigeux, le caractère neigeux étant plus marqué que dans le cas précédent, mais le caractère pluvieux étant au moins de l'ordre de 50 %,

$$|R_1| \approx 6 \%$$

3. Pour des précipitations à caractère pluvio-neigeux, mais avec une forte prédominance de la neige :

$$|R_1| \approx 22 \%$$

Dans les deux dernières éventualités, le déficit caractérise le pluviographe P_1 . Dans le cas tout à fait exceptionnel observé en 1960-1961, $|R_1| = 32 \%$. Devant l'énormité de cette valeur, nous avons comparé les valeurs des précipitations de P_1 à la valeur du stock neigeux. Si l'on désigne par ΣP la quantité cumulée des précipitations recueillies depuis le début de l'enneigement continu, par ΣF la fusion totale, ΣE l'évaporation, et ΣC la condensation au cours de la même période, et si ε désigne l'équivalent en eau du stock neigeux au dernier jour de la période, on doit avoir l'équation suivante :

$$\varepsilon = \Sigma P + \Sigma C - \Sigma F - \Sigma E$$

Si $\Sigma C = \Sigma F = \Sigma E = 0$, on a évidemment $\Sigma P = \varepsilon$.

Au cours de l'hiver 1960-1961, nous trouvons que ΣP est $< \varepsilon$, ΣP désignant les précipitations recueillies par P_1 . Cette inégalité est évidemment absurde et prouve la déficience de l'appareil. Nous avons conclu, et c'est ce qui semble confirmé par les mesures ultérieures, que non seulement l'appareil en état de fonctionnement n'est pas adapté à la mesure des précipitations neigeuses, mais encore qu'il est nécessaire de vérifier souvent le fonctionnement d'un mécanisme de pluviographe.

Examinons maintenant les valeurs prises par R_1 les deux années suivantes :

du 10-1-1961 au 5-5-1961 $R_1 = -20 \%$,

du 13-11-1961 au 14-5-1962 $R_1 = -24 \%$.

Les deux valeurs trouvées sont du même ordre de grandeur.

Si nous nous limitons à la période d'accumulation, nous trouvons évidemment des valeurs plus élevées :

du 10-1-1961 au 16-4-1961 $R_1 \approx -22 \%$,

du 13-11-1961 au 11-4-1962 $R_1 \approx -28 \%$.

Avant d'en arriver à l'estimation définitive des précipitations caractérisant chacune des trois saisons, nous allons examiner les dernières mesures obtenues en 1962-1963. Les précipitations recueillies par les deux pluviomètres A_1 et A_2 présentent, au cours de la période d'accumulation, un écart de l'ordre de 2 %. Il est évident que l'on ne peut attacher aucune signification à une valeur aussi faible. Donc, en dépit des situations et des hauteurs différentes, les deux appareils identiques recueillent les mêmes quantités. Il semble donc qu'on puisse conclure que la distribution des précipitations sur la plate-forme de mesure est sensiblement uniforme. Au cours de la période de disparition de la neige, les deux appareils donnent également des valeurs égales.

Nous nous proposons de comparer les mesures des deux pluviographes P_1 et P_2 . Au cours de cette

saison, P_1 est équipé d'un réchauffeur de voiture de marque Thermix capable de fournir soit 300 000, soit 600 000 calories par heure.

Le dispositif de chauffage est alors dépourvu de régulation thermique. Le pluviographe P_2 comporte un cône spécial à paroi fortement inclinée et un thermostat noyé dans le bain de pétrole.

L'écart entre les mesures de P_1 et P_2 est de l'ordre de 5 à 6 %, les mesures de P_1 étant plus faibles que celles de P_2 . Ces deux instruments sont situés à quelques mètres l'un de l'autre et à peu près à la même hauteur du sol. Il semble donc que l'écart observé représente la valeur de l'évaporation excédentaire dans l'entonnoir de P_1 , car on ignore la valeur de cette évaporation dans P_2 . Au cours de la période de fusion, les précipitations tombent sous forme de pluie; les appareils sont néanmoins chauffés, et l'écart reste de l'ordre de 5 %.

La comparaison des pluviographes P_2 et B montre que B fournit au cours de la période d'accumulation une mesure supérieure à celle de P_2 . L'écart est de l'ordre de 8 %. Or cet appareil (B) est très certainement déficitaire, car sa section d'entrée peut être obstruée plus ou moins complètement par des bouchons de neige. Pendant la période de fusion, au contraire, le pluviographe B présente par rapport à P_2 un déficit de l'ordre de 18 à 19 %.

P_2 indique des valeurs déficitaires par rapport au pluviomètre ordinaire lorsque les précipitations sont solides, et le contraire pour les précipitations liquides. Pour des précipitations solides, le déficit de B par rapport à A est de l'ordre de 2 à 3 %, tandis qu'il atteint 13 % pour de la pluie.

La comparaison des totalisateurs T_1 et T_2 situés à 30 m l'un de l'autre montre que l'emplacement de l'appareil n'affecte pas la mesure et il semble donc qu'on puisse affirmer que au nord, au sud et tout au moins sur la moitié ouest la plus éloignée de la lisière, la distribution des précipitations sur la plate-forme est uniforme. Ce résultat confirme la conclusion tirée des mesures des 2 pluviomètres A_1 et A_2 . L'écart entre les mesures de T_1 et T_2 , sur la totalité de la période, représente environ 1 %. Au cours de la phase d'accumulation,

l'écart est inférieur à 0,5 %. Ces mesures sont en outre supérieures à celles données par tous les autres types d'appareil. Au cours de la phase de disparition de la neige, l'écart entre les deux mesures est de l'ordre de 10 mm, mais il faut se rappeler qu'une lame de 10 mm correspond à une variation de niveau de 1 mm. Au contraire, les quantités de pluies recueillies par le totalisateur sont très inférieures aux précipitations reçues dans les pluviomètres et les pluviographes. Le déficit est de l'ordre de 20 %.

En conclusion, nous avons retenu comme représentatives des précipitations neigeuses les mesures déduites des jaugeages des totalisateurs. Pour rétablir la distribution, dans le temps, du phénomène (le totalisateur en effet ne donne qu'une valeur caractérisant une période donnée), nous avons opéré de la façon suivante : à chaque période correspondant à 2 jaugeages consécutifs du totalisateur, nous avons affecté un nombre :

$$N = \Sigma T / \Sigma P$$

où ΣP et ΣT désignent respectivement les précipitations recueillies par le pluviographe à auget et le totalisateur. Ce nombre N est en général supérieur à 1.

Lorsque $N > 1$, on multiplie par ce coefficient la valeur des précipitations recueillies par le pluviographe au cours de la période considérée et les nombres obtenus fournissent les valeurs retenues.

Si $N < 1$, on prend alors les valeurs indiquées par le pluviographe.

L'utilisation de cette méthode a donné les résultats en mm qui figurent dans le tableau 8.

Il paraît nécessaire de préciser que les valeurs retenues ne représentent qu'un ordre de grandeur des précipitations, car il est universellement admis que le totalisateur donne des mesures déficitaires. Ce déficit est fonction d'un certain nombre de paramètres : le rendement de l'appareil dépend de la turbulence et, probablement dans une plus faible proportion, de l'accumulation de la neige lourde entre les parois du bidon et le cône de Nipher. Cette masse de neige peut obstruer complètement l'orifice d'entrée du réservoir. Dans nos conditions d'utilisation, l'appareil est nettoyé dès que possible. Le problème de la turbulence a été étudié par de nombreux chercheurs, depuis les premières études de Nipher, et l'influence du cône n'est plus contestée.

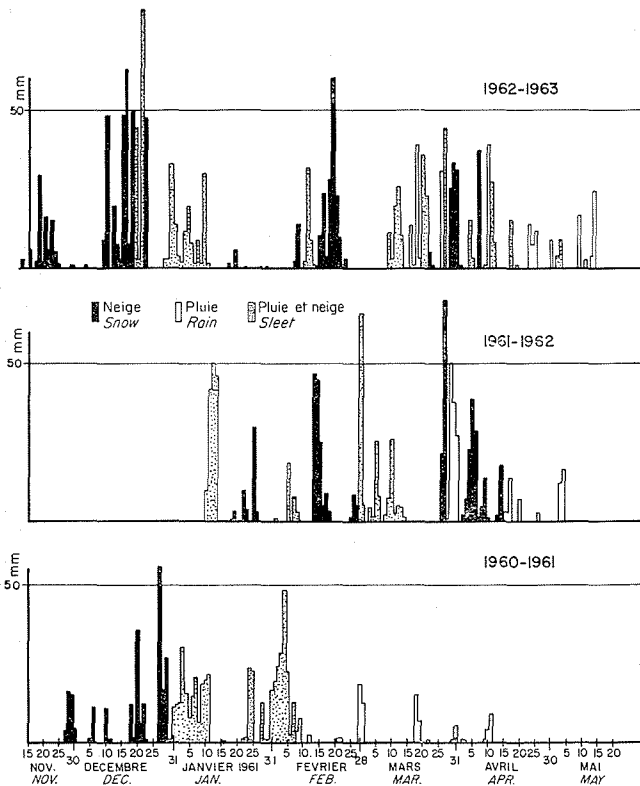
Nous avons essayé, en utilisant des coefficients de correction des précipitations en fonction du vent, de déterminer l'ordre de grandeur du déficit provoqué par la turbulence au cours de la saison 1961-1962. Du 10-1-1961 au 16-4-1962, nous avons trouvé une valeur de l'ordre de 125 mm soit près de 15 % des précipitations recueillies pendant la période d'accumulation. Nous n'avons pas tenu compte de ce déficit, car il est loin d'être prouvé que ces coefficients soient universels.

Les graphiques 2 et 3 donnent une représentation de précipitations quotidiennes de 0 à 24 h et des précipitations cumulées. Le caractère de la chute : pluie, pluie ou neige, neige, n'a pas toujours été déterminé par une observation directe, et n'a par conséquent, et plus particulièrement dans le cas de pluie ou de neige, qu'un caractère aléatoire.

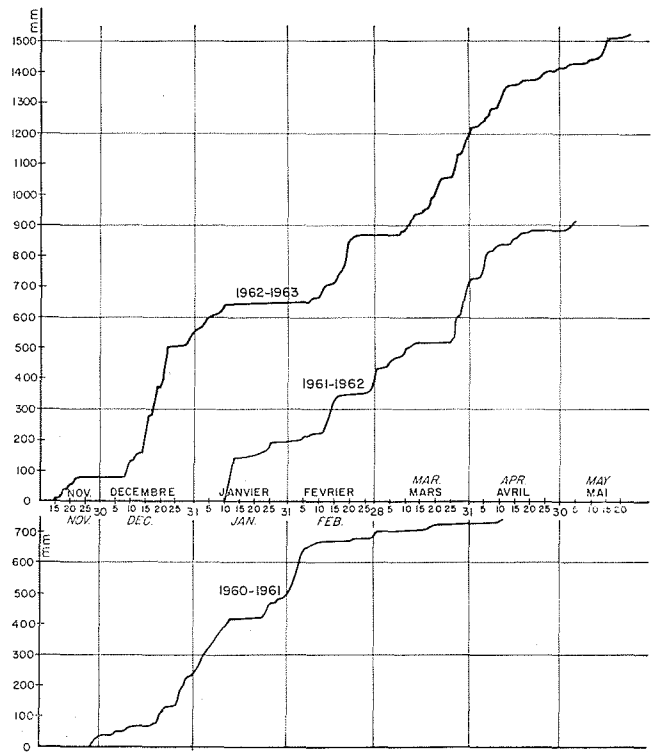
Nous avons utilisé, pour le préciser, les mesures des températures de l'air sous abri au moment de

Tableau 8

	PRÉCIPITATIONS TOTALES	NEIGE	PLUIE
<i>1960-1961</i>			
27-11-60 au 10-3-61.....	697	594	103
10-3-61 au 1-4-61.....	40	8	32
du 27-11-60 au 11-4-61..	737	602	135
<i>1961-1962</i>			
10-1-62 au 16-4-62.....	861	592	269
16-4-62 au 4-5-62.....	56	0	56
du 10-1-62 au 16-4-62..	917	592	325
<i>1962-1963</i>			
13-11-62 au 11-4-63.....	1 349	1 009	340
11-4-63 au 15-5-63.....	128	0	128
du 13-11-62 au 15-5-63..	1 477	1 009	468



2/ Précipitations quotidiennes.
Daily rainfall.



3/ Précipitations cumulées.
Annual rainfall charts.

la chute. On sait qu'il n'existe pas de loi pour définir le caractère de la précipitation en fonction des paramètres météorologiques au sol. On admet que, si la température de l'air en surface est supérieure à 1,5 °C, la probabilité des précipitations pluvieuses est supérieure à celle des chutes de neige. C'est le contraire qui se produit lorsque la température de l'air en surface est inférieure à 1 °C. La figure 4 représente la distribution du caractère des précipitations en fonction de la température de l'air en surface (figure extraite de « Snow Hydrology »).

1.2. Masse spécifique et équivalent en eau de la couche de neige.

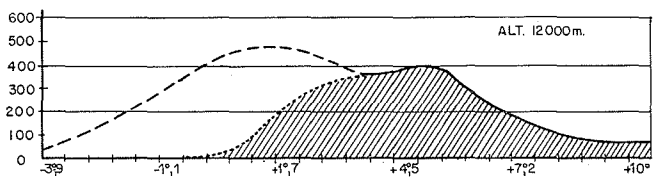
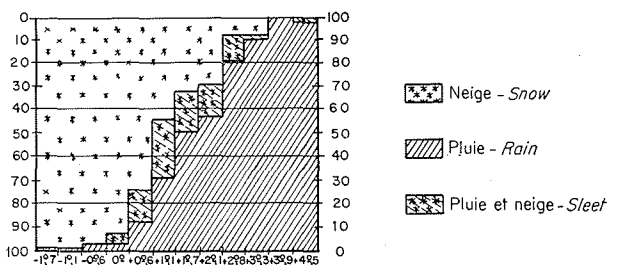
Une couche de neige peut être caractérisée par sa masse spécifique apparente, et chacune des couches élémentaires par sa masse spécifique propre.

1.2.1. DESCRIPTION DES APPAREILS ET PROCÉDÉS DE MESURE.

Nous avons employé deux procédés de mesure; le premier nécessite l'intervention d'un observateur et provoque la destruction de la couche étudiée; le second est automatique, n'entraîne aucune perturbation du manteau et par conséquent autorise des mesures relatives.

a) La première méthode consiste à extraire, verticalement, une carotte de neige sur toute l'épaisseur de la couche. Le rapport de la masse au volume de l'échantillon représente la masse spécifique apparente de la neige et celui de la masse à la section, l'équivalent en eau. Pour obtenir une mesure significative, il est nécessaire de procéder à l'extraction d'au moins cinq échantillons.

Les différents modèles de sondes diffèrent essentiellement par leur section. Les deux modèles dont



4/ Distribution du caractère des précipitations en fonction de la température.
Rainfall type distribution in terms of temperature.

nous disposons, réalisés par la D.T.G., ont respectivement 54 et 70 mm de diamètre.

L'extraction d'un échantillon est souvent difficile et il est parfois nécessaire de faire pénétrer la sonde dans le sol pour former un bouchon de terre qui permet de retirer intégralement la carotte.

Si on désigne respectivement par m la masse de l'échantillon, par s la section du couteau, par h , la hauteur de la carotte, par ϵ l'équivalent en eau, et par ρ la masse spécifique apparente, on a :

$$\epsilon = \frac{m}{s} , \quad \rho = \frac{m}{sh}$$

et par conséquent, $\epsilon = \rho h$.

En général, ε est exprimé en kg/m² ou en mm et ρ en kg/m³. Toutefois, lorsqu'on utilise le système C.G.S., il convient d'exprimer ρ en g/cm³.

Ce procédé de mesure, extrêmement simple, présente le grave inconvénient de détruire le milieu étudié. Or la dispersion de ρ en fonction de l'espace est grande et, par conséquent, toute comparaison de mesures consécutives est aléatoire. Nous donnons ci-dessous les diverses valeurs de ρ obtenues les 13 et 14 mars 1963 en divers points du terrain expérimental (kg/m³) :

334 - 342 - 332 - 346 - 346 - 352 - 324 - 321 - 335
 331 - 320 - 372 - 359 - 338 - 334 - 348 - 334 - 348
 331 - 368 - 324 - 350 - 346 - 328 - 323 - 342
 333 - 334 - 382 - 359 - 376 - 345 - 365 - 347 - 367
 348 - 357 - 329 - 356 - 344 - 353 - 359 - 387 - 343
 346.

Ces mesures ont été effectuées à l'intérieur d'un carré d'environ 25 m de côté. La valeur moyenne est 346 kg/m³ et l'écart-type 15 kg/m³. Le coefficient de variation est donc légèrement inférieur à 0,05. L'ensemble des épaisseurs de la couche aux divers points de mesure est caractérisé par une moyenne $\bar{h} = 200$ cm et un écart-type $\sigma_h = 10$ cm. Le coefficient de variation σ_h/\bar{h} est donc égal à 0,05, et par conséquent la dispersion de ρ s'expliquerait par celle de h .

Les erreurs de mesure sur ε sont négligeables; en effet :

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \leq \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta s}{s};$$

Or les erreurs relatives sur m et sur s sont probablement de l'ordre de 0,01. Il convient de préciser que seule la lame d'eau contenue dans l'échantillon est connue avec une telle précision.

L'erreur sur la mesure de ρ est plus importante. On a en effet :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \leq \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta h}{h};$$

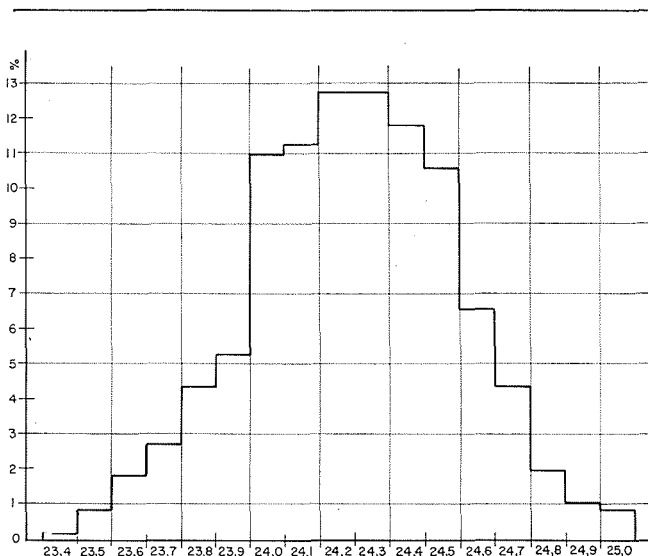
en négligeant les 2 premiers termes du second membre :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \frac{\Delta h}{h}.$$

Lorsque h est petit, l'erreur relative sur h peut facilement atteindre 10 %. Lorsque h croît, Δh restant pratiquement constant, la précision augmente. On peut améliorer la précision sur h en creusant une tranchée jusqu'au sol et, après avoir procédé à l'extraction d'une carotte, on mesure l'épaisseur. Dans le cas le plus défavorable, l'erreur relative sur h est alors de l'ordre de 0,05. Mais cette méthode provoque la destruction d'un prisme de neige de 1 m² de base.

b) Le nivographe à rayons γ assure une mesure automatique suivant un cycle préétabli, et présente l'avantage de ne provoquer aucune destruction du manteau neigeux.

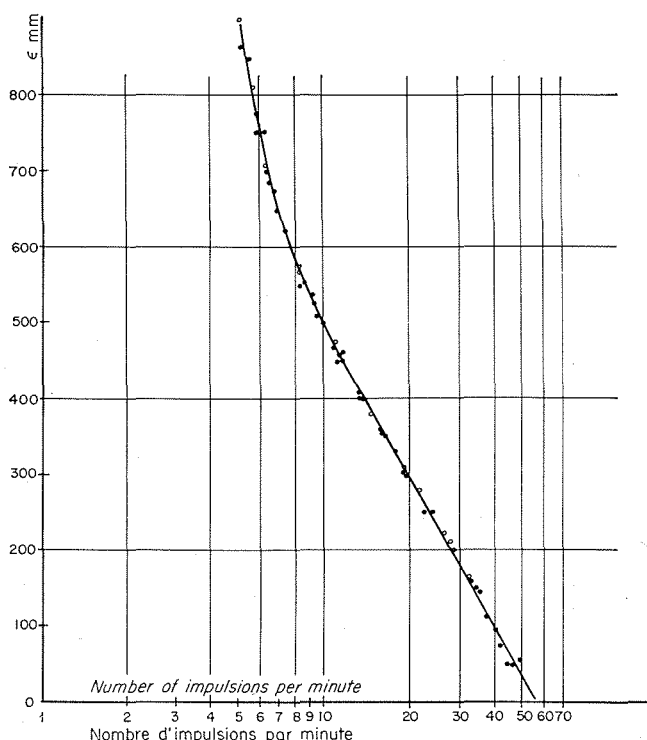
L'appareil se compose d'une source de cobalt 60, placée au niveau du sol et émettant verticalement vers le haut un faisceau de rayons γ , d'un compteur Geiger-Muller placé sur le trajet des photons constituant le rayonnement, d'un ensemble intégrateur électro-mécanique et d'un enregistreur. L'enregis-



5/ Distribution des fréquences au cours du cycle étalonnage. Frequency distribution during calibration cycle.

Tableau 9

ÉPAISSEUR en mm d'eau	FRÉQUENCE MOYENNE impulsions par minute	ECART-TYPE		COEFFICIENT DE VARIATION
		impulsions par minute	mm d'eau	
300	19,13	0,20	3	0,01
500	9,70	0,10	5	0,01
850	5,53	0,10	15	0,02



6/ Courbe d'étalonnage du nivomètre à rayons. Gamma ray snowmeter calibration curve.

trement permet le calcul de la fréquence des impulsions émises par le compteur. Le programme des mesures est distribué par un moteur synchrone actionnant une série de cames.

Pour remédier au manque de fidélité de la chaîne métrologique, le dispositif suivant avait été adopté : au cours de chaque cycle, le compteur est soumis au rayonnement de la source de cobalt, c'est la phase de mesure; puis au cours de la phase étalonnage il est placé en dehors du trajet des rayons émis par la source de cobalt, mais il est alors soumis au rayonnement d'une source de strontium 90.

Pendant l'hiver 1962-1963, nous avons extrait de la population des fréquences des impulsions émises au cours du cycle étalonnage, un échantillon de 1 331 individus. Le calcul a montré que la fréquence moyenne était égale à 24,24 impulsions par minute, avec un écart type de 0,30 impulsion par minute, soit un coefficient de variation de l'ordre de 0,013. Après avoir constaté une aussi faible valeur de la dispersion, sous des conditions de fonctionnement variées, nous avons supprimé la phase étalonnage. L'histogramme de la statistique est présenté sur la figure 5.

La fréquence des impulsions étant, entre autres, fonction de la valeur du courant débité par la plaque d'une lampe triode, nous avons placé un microampèremètre et un milliampèremètre qui permettent de contrôler respectivement les valeurs du courant plaque, et du courant de chauffage du filament. Nous avons pu constater la stabilité de ces deux courants.

En octobre 1963, nous avons procédé à des essais de fidélité de l'appareil, en disposant entre le compteur, et la source, des écrans d'épaisseur constante. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 9.

La fidélité de l'appareil au-delà de 500 mm est fortement influencée par la valeur de ε . Il est possible de remédier à ce défaut en augmentant l'intensité du rayonnement. Quoi qu'il en soit, pour des valeurs de ε inférieures ou égales à 500 mm, la mesure est acceptable. Le graphique 6 représente la courbe d'étalonnage utilisée au cours de la saison 1962-1963.

Au cours de la saison 1962-1963, un second nivomètre à rayons γ , réalisé par la D.T.G., fut mis en service. La source de cobalt, d'une activité de 500 milli-curies environ, est placée à 3 m au-dessus du sol et émet un faisceau vertical de rayons γ , vers deux compteurs Geiger-Muller placés dans une pièce souterraine. Les compteurs restent ainsi dans une enceinte pratiquement isotherme. La chaîne de comptage, entièrement électronique, est associée à un émetteur de télégraphie sans fil qui transmet directement la mesure à Grenoble. Afin de rendre la précision de la mesure indépendante de l'épaisseur, l'appareil mesure le temps nécessaire au comptage de 10 000 impulsions. Cette précision est de l'ordre de 1,6 mm.

c) Des cylindres en laiton de 500 cm³ et de 20 cm de long permettent de mesurer directement la masse spécifique de chacune des couches élémentaires dont l'ensemble forme le manteau neigeux.

Après avoir creusé une trancheé jusqu'au sol, la sonde est introduite horizontalement dans la couche dont on veut connaître la densité. Le quotient

du double de la masse de l'échantillon par mille donne la masse spécifique en grammes par cm³. En général, on effectue une mesure tous les 10 centimètres et on représente graphiquement la variation de ρ en fonction de la cote au-dessus du sol z , à un instant donné. Connaissant les valeurs de $\rho(z)$ et de l'épaisseur des tranches, on déduit celle de la masse spécifique apparente :

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i(z) h_i}{h}$$

1.2.2. DISPOSITIF UTILISÉ.

Au cours des hivers 1960-1961 et 1961-1962, nous disposions des diverses sondes décrites et du nivographe à rayons γ réalisé par la Division des Essais Extérieurs. Cet appareil était installé au nord du terrain à une dizaine de mètres environ à l'ouest du bâtiment. La source de cobalt était scellée dans un bloc de béton.

Nous avons constaté les deux défauts suivants : d'une part l'emplacement était mal choisi, son enneigement est moins important que sur la plate-forme et, d'autre part, la présence de la dalle de béton introduisait des perturbations importantes. Le sol est argileux et, par conséquent, sous certaines conditions, l'eau qui percole à travers la couche de neige peut s'accumuler à sa base et intervenir dans la valeur de l'équivalent en eau de la couche. Au contraire, cette eau s'écoule à la surface de la dalle de béton et le nivographe peut donner une mesure déficitaire. Ce déficit peut atteindre et dépasser 50 mm dans le cas d'une chute intense de pluie.

Au cours de la première année, nous avons exploré un mauvais fonctionnement de l'enregistreur; au cours de la deuxième, l'intégrateur eut un fonctionnement assez capricieux; le système d'enregistrement utilisé alors fonctionna correctement. En octobre 1962, nous avons placé le nivographe à proximité de la plate-forme de mesure et à côté d'un détecteur de niveau mesurant l'épaisseur de la couche. La dalle de béton fut supprimée et la source scellée directement dans le sol. Malheureusement, celui-ci n'était pas suffisamment stabilisé et sous l'action des charges de neige exceptionnelles, la source s'est déplacée et une partie des mesures fut inutilisable. A partir du mois d'avril, le télénivographe a pris le relais de l'appareil défaillant.

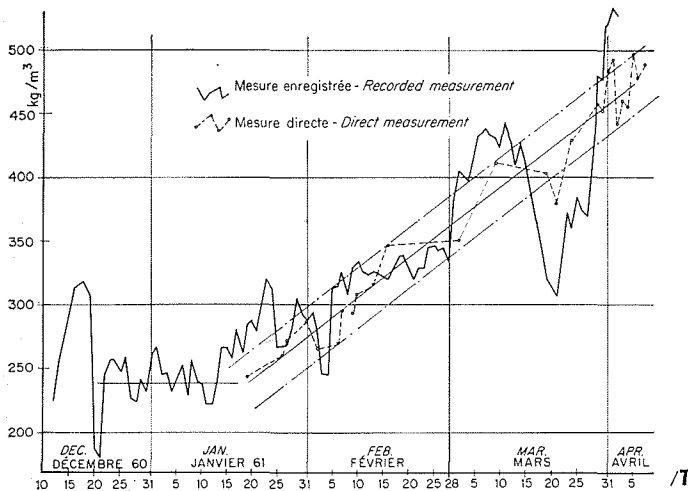
1.2.3. RÉSULTATS DES MESURES.

Il n'est pas question de publier l'intégralité des mesures, le nivographe effectuant de 6 à 8 mesures par jour pendant tout l'hiver.

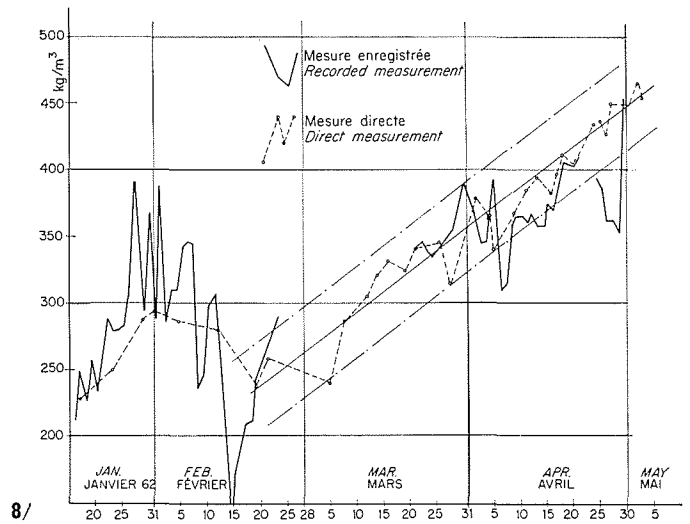
Les variations de la masse spécifique apparente en fonction du temps sont représentées sur les graphiques 7, 8 et 9. Nous n'avons retenu, pour tracer ces courbes, qu'une mesure par jour, soit celle de 12 heures, soit celle de 15 heures, suivant l'heure de la mesure directe. Les résultats de ces dernières figurent également sur les graphiques.

Les figures 10 et 11 représentent les variations de ρ en fonction de la cote z et du temps t du 4 au 16 avril 1962, et la structure de la neige.

Les figures 12, 13 et 14 représentent enfin les variations de ρ et de ε et les précipitations quotidiennes.



7/



8/

7/ Masse spécifique apparente 1960-1961.
Bulk density 1960-1961.

8/ Masse spécifique apparente 1961-1962.
Bulk density 1961-1962.

9/ Masse spécifique apparente 1962-1963.
Bulk density 1962-1963.

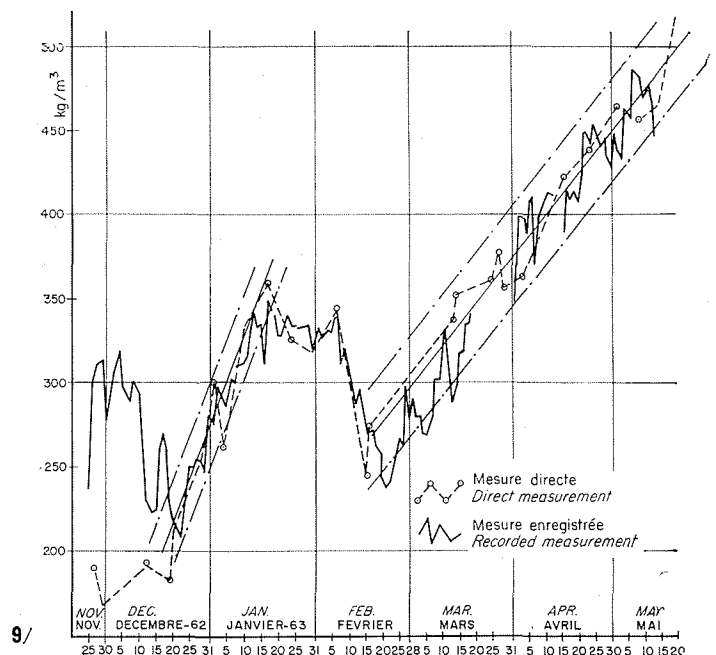
10/ Variation de la masse spécifique en fonction de la cote.
Variation of specific gravity with height.

11/ Structure de la neige.
Snow structure.

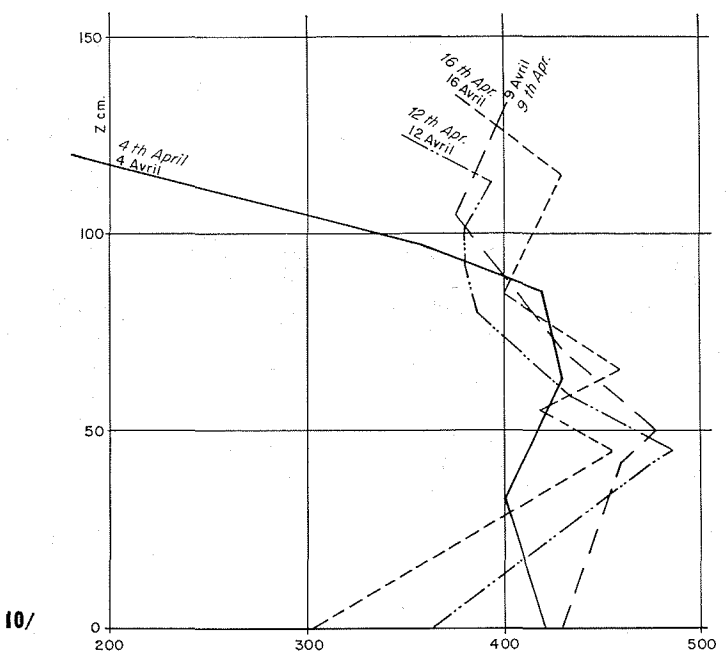
12/ Masse spécifique, équivalent en eau et précipitations quotidiennes 1960-1961.
Specific gravity, water equivalent and daily rainfall 1960-1961.

13/ Masse spécifique, équivalent en eau et précipitations quotidiennes 1961-1962.
Specific gravity, water equivalent and daily rainfall 1961-1962.

14/ Masse spécifique, équivalent en eau et précipitations quotidiennes 1962-1963.
Specific gravity, water equivalent and daily rainfall 1962-1963.

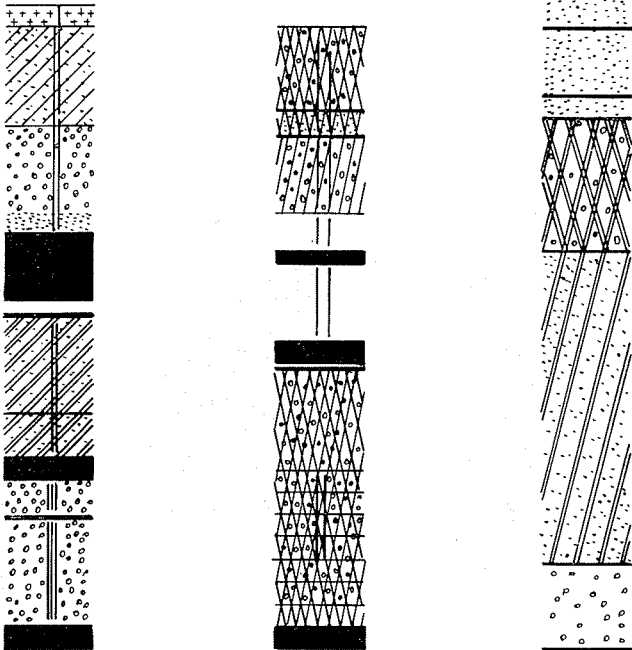


9/



10/

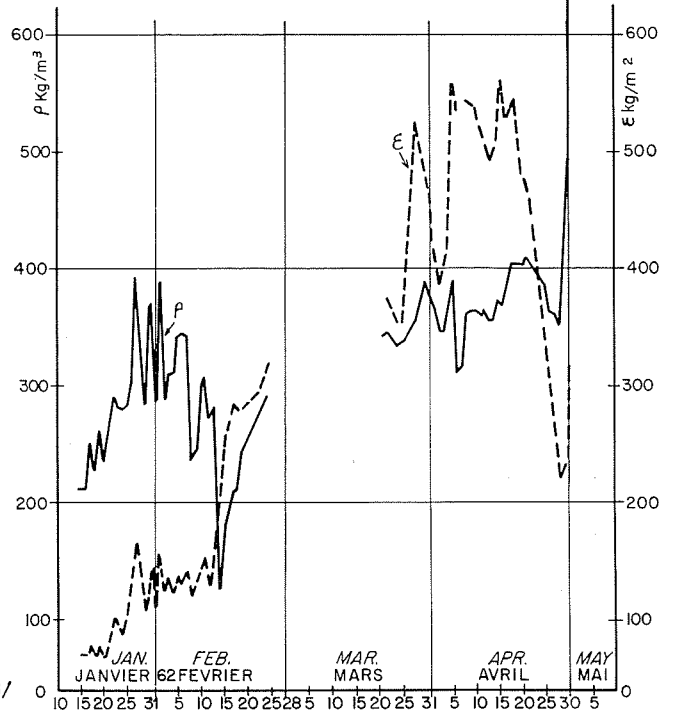
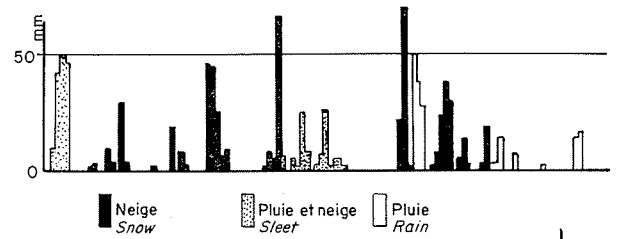
- ++++ Neige fraîche - *New snow*
- Grains fins - *Fine grains*
- Grains grossiers - *Coarse grains*
- Neige ou névé - *Snow or névé*
- Neige très tendre - *Very soft snow*
- Neige tendre - *Soft snow*
- Neige mi dure - *Fairly hard snow*
- Neige dure - *Hard snow*
- Neige sèche - *Powder snow*
- Neige humide - *Wet snow*
- Neige mouillée - *Slushy snow*
- Neige très mouillée - *Very slushy snow*
- Neige très dure - *Very hard snow*



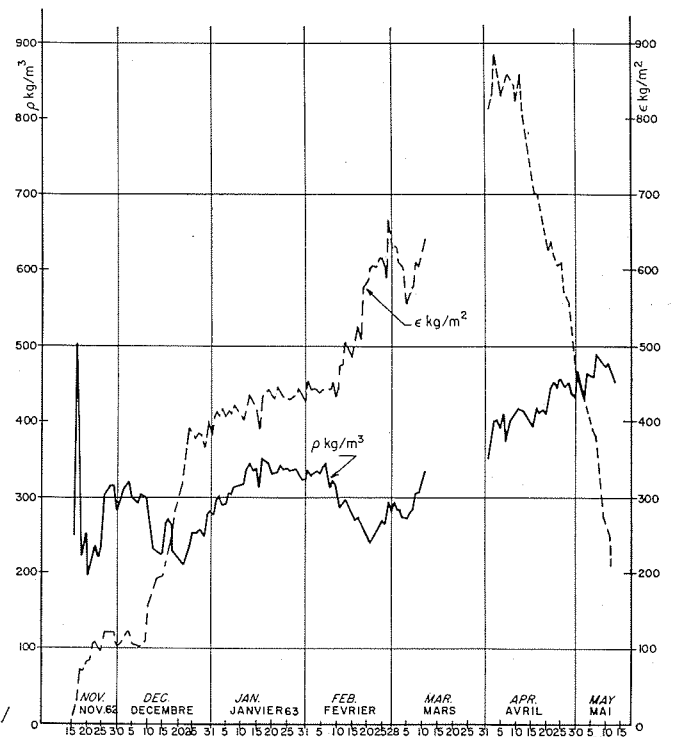
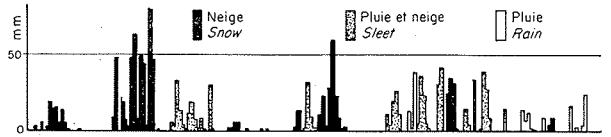
9 AVRIL 1962
9th Apr.

11 AVRIL 1962
11 Apr.

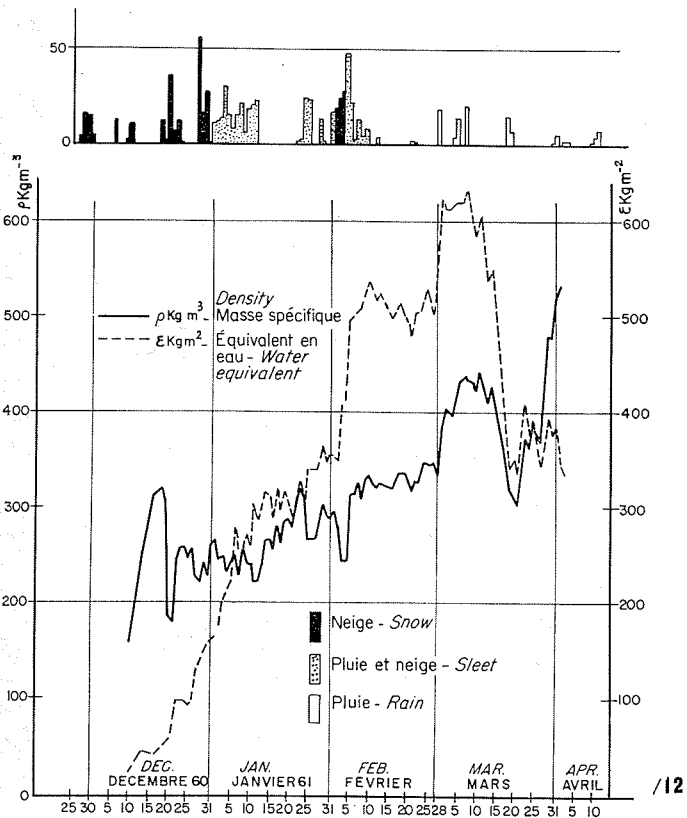
21 MARS 1963
21 March



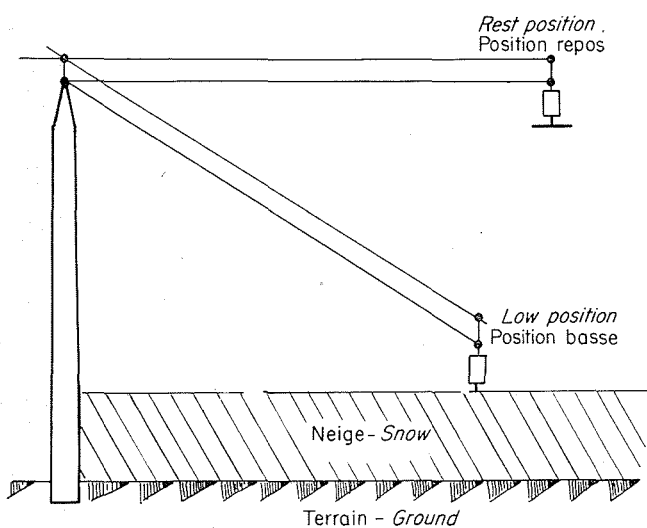
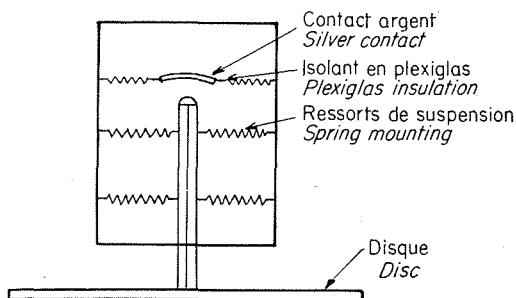
13/



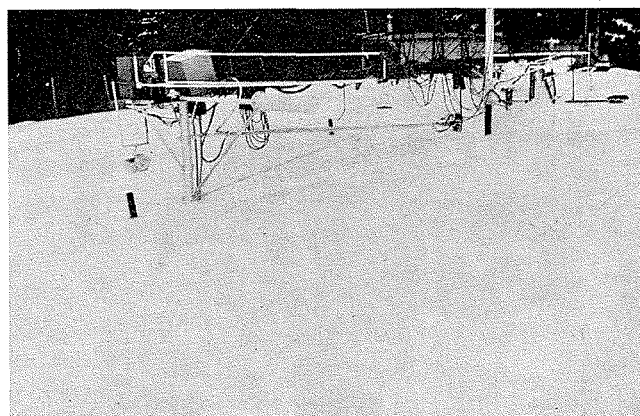
14/



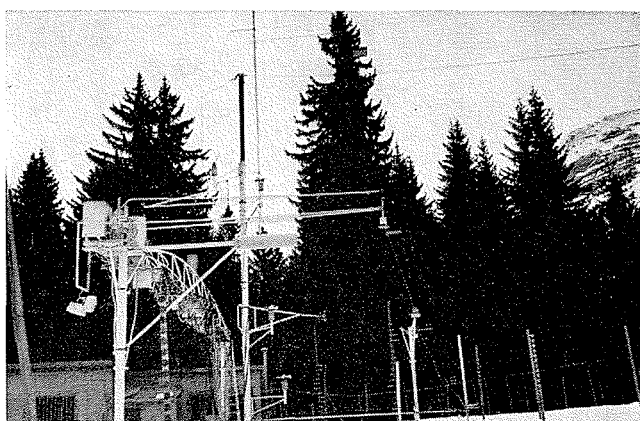
12/



15 a/ Détecteur de niveau.
 Snow level gauge.



15 b/ Vue du portique (enneigement : 180 cm).
 The gangway under 1.8 m of snow.



15 c/ Passerelle supportant les divers appareils et mât télescopique.
 Gangway used for mounting the various items of equipment and telescopic mast.

Les valeurs de ϵ qui représentent l'estimation de l'équivalent en eau dans le voisinage du lysimètre ont été calculées de la façon suivante :

On suppose que la masse spécifique apparente de la neige à un instant t donné reste constante dans toutes les directions horizontales sur la plateforme de mesure. Soit ϵ_0 la valeur de l'équivalent en eau au-dessus de la source de cobalt, h_0 l'épaisseur de la couche à l'instant t , on a donc :

$$\rho_0 = \epsilon_0 / h_0$$

Si h_1 représente l'estimation de l'épaisseur à proximité du lysimètre, et ϵ_1 l'équivalent en eau correspondant, on a :

$$\epsilon_1 = \rho_0 \cdot h_1.$$

On a donc :

$$\frac{\Delta \epsilon_1}{\epsilon_1} \leq \frac{\Delta \epsilon_0}{\epsilon_0} + \frac{\Delta h_1}{h_1} + \frac{\Delta h_0}{h_0}$$

dans l'hypothèse où $\rho_0(t) = \text{Cte}$.

En supposant l'erreur sur ϵ_0 négligeable devant les autres, on peut admettre, dans la meilleure des hypothèses, c'est-à-dire lorsque l'enneigement est au moins de l'ordre de 1 m et que h_0 et h_1 sont mesurés, une erreur de l'ordre de 0,05 à 0,10. Dans le cas contraire, elle peut atteindre 0,20.

Au cours de l'hiver 1960-1961, h_0 a été estimé de la façon suivante :

Jusqu'à la fin de février, $h_0 = h$; à partir de mars $h_0 = h - 5$ cm; h représente l'épaisseur de la couche en cm, mesurée automatiquement par un détecteur de niveau (fig. 15 a et b) qui assure l'enregistrement de la mesure. L'observation a montré que pendant les mois froids, les épaisseurs étaient du même ordre à proximité du nivomètre et du détecteur, et qu'ensuite apparaissait un léger écart.

Les valeurs de h_1 ont été calculées de la façon suivante :

du 10-12-1960	au 25-1-1961	$h_1 = h + 5$ cm
du 26-1-1961	au 22-2-1961	$h_1 = h + 10$ cm
du 23-2-1961	au 9-3-1961	$h_1 = h + 15$ cm

L'épaisseur de la couche croît en effet de l'emplacement du détecteur de niveau à celui du lysimètre.

Au cours de la saison 1961-1962, les épaisseurs h_0 et h_1 ont été mesurées directement, h_0 lors de l'extraction de carottes de neige dans le voisinage du nivographe et h_1 par la moyenne arithmétique des mesures lues sur 4 perches entourant le lysimètre. Dans la mesure du possible, il a été tenu compte de l'erreur introduite par la présence de la dalle de béton. D'une façon générale, au cours de ces deux premières années, il ne paraît pas possible d'utiliser les mesures du nivographe pendant la fusion. La présence de la dalle et sa situation font que les conditions de fusion près du nivomètre ne sont pas

représentatives du phénomène observé sur la plateforme de mesure.

Au cours de l'hiver 1962-1963, l'enneigement fut particulièrement important, et à la suite du déplacement de la source, le rayonnement vertical incident, déjà faible eu égard à l'épaisseur de la couche, a été atténué, si bien que du 20 mars au 22 avril, l'enregistrement donne la mesure du bruit de fond du compteur. A partir du 7 avril, le télénivographe a fonctionné de façon satisfaisante, et nous avons utilisé les résultats de cet appareil. Etant donné l'importance du cratère autour de la source, nous avons estimé l'épaisseur h_0 par la relation $h_0 = h - 5$ cm. Les valeurs de h_1 représentent les moyennes arithmétiques des valeurs lues sur 4 perches. Bien que l'enneigement, dans le voisinage du télénivographe, accuse un déficit de 200 mm par rapport à l'épaisseur de la couche autour du lysimètre, et en dépit des perturbations introduites par le support de la source et la présence de la chambre souterraine, on verra dans un prochain chapitre que les deux appareils ont donné, en valeurs relatives, des résultats comparables.

En octobre 1963, le télénivomètre a été placé à proximité immédiate du lysimètre. Pour limiter les perturbations introduites par le support métallique de la source, nous l'avons réfrigéré. Ce support, constitué par un tube de 10 cm de diamètre, est rempli d'un mélange d'eau et d'antigel, qu'une pompe permet de faire circuler. Lorsque, sous l'action du rayonnement solaire, la partie du support qui baigne dans l'air se réchauffe, un thermostat ferme le circuit de la pompe qui refoule vers le haut le mélange réfrigérant à la température de la neige, le refroidissement du fluide s'effectue dans un serpent en laiton. Il a été possible, malgré des conditions défavorables, de limiter le cratère autour du support.

1.2.4. EXAMEN DES RÉSULTATS.

La densité de la neige est intimement liée à son tassement. La neige fraîche, qui est relativement légère, accuse sous l'action de certaines forces une diminution de volume, sans variation de masse, ce qui se traduit par une augmentation de sa masse spécifique au cours du temps. Une nouvelle chute de neige provoque une diminution passagère de la masse spécifique apparente. Nous avons porté sur une même figure (12, 13, 14) les variations de ρ et de ε en fonction du temps et les valeurs des précipitations quotidiennes.

1.2.4.1. Hiver 1960-1961.

Au cours de la première année (fig. 7), on peut constater que les mesures directes et les mesures enregistrées, eu égard à la grande dispersion du paramètre en fonction de l'espace et à la qualité des mesures enregistrées, ne présentent pas d'écarts anormaux, sauf aux environs du 22 mars. Du 10 au 20 décembre, les variations rapides de la masse spécifique sont liées d'une part aux chutes de neige et, d'autre part, aux erreurs de mesure. On sait que pendant les 3 ou 4 jours qui suivent la chute, la densité augmente rapidement, puis plus lentement ensuite. Lorsque l'épaisseur est faible, l'erreur relative sur h et par conséquent sur ρ , est grande. Quoi qu'il en soit, au cours de cette période, par suite d'une basse température jusqu'au 18 janvier et

d'une faible épaisseur, la masse spécifique reste pratiquement constante; sa valeur moyenne est de l'ordre de 240 kg/m³. Elle croît ensuite linéairement en fonction du temps suivant la loi :

$$\rho(t) = 3,0 t + 239$$

où t représente le nombre de jours à partir du 18 janvier. Le coefficient de corrélation $r = 0,99$ et l'écart type lié $\sigma_{\rho t} = 12$. A la fin de février, elle atteint environ 350 kg/m³, et la valeur maximale est de l'ordre de 450 kg/m³. La décroissance observée du 13 au 22 mars, aussi bien sur les mesures directes que sur les mesures enregistrées, peut s'expliquer par une diminution importante de la masse liée à une élévation de la température; du 10 au 31 mars, la somme des températures positives moyennes est de l'ordre de 77 degrés jour, ce qui correspond à un écoulement de l'ordre de 350 mm si l'on utilise la relation de Zingg, et de l'ordre de 320 mm si on se sert d'une de nos relations dont il sera question dans le chapitre II. Or, du 10 au 20 mars, la variation d'équivalent en eau à proximité du nivographe est de l'ordre de 300 mm et, du 23 au 28, de l'ordre de 60 mm. Les précipitations liquides atteignent 30 mm. La croissance de ρ observée à partir du 22 mars est probablement liée à un tassement de la couche superficielle consécutif à l'élévation de la température et à la disparition provoquée par la fusion de couches relativement moins denses que les couches inférieures. L'écart observé entre les mesures directes et enregistrées est probablement lié à l'écoulement de l'eau sur la dalle du nivographe, et à son accumulation à la base de la couche sur le sol naturel.

1.2.4.2. Hiver 1961-1962 :

Au cours de l'hiver 1961-1962 (fig. 8), et à partir du 22 mars, on constate une bonne correspondance entre les mesures directes et les mesures enregistrées. Au contraire, du 15 janvier au 15 février, les écarts sont très grands et probablement liés à la faible valeur de l'épaisseur qui se traduit par une forte erreur relative sur ρ . Les fluctuations observées au cours de cette même période peuvent partiellement être imputées aux précipitations; au contraire, certaines d'entre elles sont probablement dues à des erreurs de mesure. La variation du 27 au 29 janvier est consécutive aux chutes du 21 au 26; celles du 7 au 8 et du 13 au 14 février sont provoquées par les chutes du 6 au 9 et du 13 au 17 février. Celles du 30 au 31 janvier et du 1^{er} au 2 février sont probablement dues à des erreurs.

A partir du 24 février, ρ varie linéairement avec le temps suivant la relation :

$$\rho(t) = 3,0 t + 233 \quad r = 0,89 \quad \sigma_{\rho t} = 18$$

Au début de la saison, la neige est relativement lourde, sa masse spécifique apparente varie de 240 kg/m³ à 300 kg/m³. A la fin du mois de février, par suite de chutes de neige importantes, elle atteint seulement 250 kg/m³; la valeur maximale en mai s'élève à 480 kg/m³. A la fin du mois de mars, on constate, aussi bien sur les mesures directes que sur les mesures enregistrées, une augmentation de ρ , liée à une chute de pluie de l'ordre de 115 mm, puis, tandis qu'après la percolation de cette eau, la masse spécifique apparente enregistrée reprend sensiblement sa valeur initiale, la mesure directe accuse

un accroissement. En effet, toute l'eau de pluie qui a atteint la dalle du nivographe s'est écoulée, tandis que le lysimètre n'accuse qu'un écoulement de 45 mm; la différence, soit 70 mm, s'est amassée à la base du manteau sur le sol naturel en provoquant la formation d'une couche de névé très dense. On voit nettement sur la figure 13 que l'équivalent en eau enregistré par le nivographe accuse du 28 mars au 2 avril un écoulement de l'ordre de 130 mm. La variation de ρ du 5 au 6 avril est au contraire liée à la chute de neige observée au début d'avril.

1.2.4.3. Hiver 1962-1963 :

Au cours de la saison 1962-1963, on constate (fig. 9), à l'exception des mesures initiales, une parfaite correspondance entre les valeurs enregistrées et les valeurs mesurées. La qualité des mesures s'est améliorée, d'une part en ce qui concerne les mesures directes, par suite de l'expérience acquise et, d'autre part, en raison des modifications apportées au nivographe (suppression de la dalle de béton) et de l'utilisation à partir du début avril du télénivographe. Les écarts constatés du 25 novembre au 15 décembre sont probablement dus à la faible valeur de l'enneigement.

La courbe de $\rho(t)$ présente les caractéristiques déjà observées; une chute de neige provoque une diminution passagère suivie d'un accroissement.

Du 20 décembre au 15 janvier, ρ varie en moyenne linéairement avec le temps suivant la loi :

$$\rho(t) = 5,3t + 208 \quad r = 0,97 \quad \sigma_{\rho t} = 12$$

Du 15 janvier au 7 février, $\rho(t)$ reste constant. En effet, cette période est caractérisée par l'absence de précipitations, et par une température de l'air très basse. La température minimale atteint -22°C . Les importantes chutes du 7 au 23 février provoquent une décroissance de ρ qui varie de 330 kg/m^3 à 250 kg/m^3 .

A partir du 15 février, ρ varie en moyenne linéairement en fonction du temps suivant la loi :

$$\rho(t) = 2,5t + 264 \quad r = 0,98 \quad \sigma_{\rho t} = 15$$

Jusqu'au 20 décembre, la masse spécifique reste inférieure à 200 kg/m^3 . Vers le 15 janvier, elle est de l'ordre de 330 kg/m^3 . La valeur maximale atteinte vers le 20 mars est de l'ordre de 500 kg/m^3 .

1.2.4.4. Estimation de l'équivalent en eau :

Les deux premières années, la lame d'eau équivalente maximale est de l'ordre de 630 à 650 mm. Tandis que, la troisième année, elle atteint 880 mm.

Les figures 12 et 13 représentent les variations de ρ en fonction du temps ainsi que celles de l'estimation de l'équivalent en eau dans le voisinage du lysimètre, calculé à partir des mesures enregistrées; ces dernières doivent être éventuellement corrigées en fonction des pertes par ruissellement sur la dalle en béton. La figure 14 représente également les variations de $\rho(t)$ et de ε à proximité du lysimètre. Ces dernières valeurs n'ont plus à être corrigées,

en raison de la suppression de la dalle de béton, puis de l'utilisation du télénivographe.

1.2.4.5. Variation de ρ en fonction de z :

Le graphique n° 10 représente les variations de $\rho(z)$ en fonction de la distance au sol les 4, 9, 12 et 16 avril 1962. Ces mesures ont été effectuées dans la partie sud du terrain, sur un sol incliné, et favorisant par conséquent le ruissellement de l'eau. Du 28 au 31 mars, on a relevé une chute de pluie de l'ordre de 115 mm. Sur la plate-forme de mesure, seule une partie de cette eau s'est écoulée, tandis que le reste, soit environ 70 mm, restait emmagasiné à la base de la couche. A l'emplacement des mesures, au contraire, presque toute cette eau s'est écoulée et la couche de névé à la base était bien moins mouillée. Du 2 au 11 avril, on observe une chute de neige; du 2 au 6, la chute représente une lame d'eau d'environ 100 mm, et du 6 au 11 moins de 20 mm. Cette chute importante — la chute du 2 au 4, qui représente environ 70 mm d'eau — est responsable de la légèreté de la couche superficielle dont la masse spécifique est de l'ordre de 180 kg/m^3 ; le 9 avril, cette neige s'est tassée, l'élévation de la température constatée à partir du 6 ayant probablement accéléré le processus, et la masse spécifique de la couche superficielle est alors de l'ordre de 400 kg/m^3 .

A la suite de la chute de pluie de la fin mars, la neige est saturée d'eau; en raison de l'intensité du débit, l'eau a pu traverser les couches de glace à grains grossiers existant dans le manteau; la masse spécifique varie peu, sur tout le profil entre le sol et $0,85 \text{ m}$ on a : $400 \text{ kg/m}^3 < \rho < 425 \text{ kg/m}^3$. Sous l'action de l'onde de froid du 5 au 7 avril, l'eau liquide s'est transformée en glace, ce qui explique l'augmentation de ρ entre 50 et 65 cm du 4 au 9 avril. Les températures positives du 10 au 15 avril ont provoqué une fonte de la couche superficielle, mais les températures négatives du 14 au 16 avril favorisent la formation d'une couche de glace à 20 cm de la surface, d'où une augmentation de ρ , qui passe de 395 kg/m^3 le 12 à 430 kg/m^3 le 16.

Une représentation de la structure du manteau est donnée par la figure 11.

L'eau saturant le névé à la base de la couche s'écoule, tandis que l'alimentation à partir de la surface cesse en raison, d'une part, de la présence de glace vers 50 cm et, d'autre part, du refroidissement. La concomitance de ces deux phénomènes explique la diminution de la masse spécifique à la base de la couche, qui passe de 430 kg/m^3 le 9 à 375 kg/m^3 le 12, et à 300 kg/m^3 le 16.

Le 11 avril, la masse volumique de la glace à la base de la couche, sur la plate-forme de mesure, était de l'ordre de 750 kg/m^3 .

Sur la figure 11, nous avons également représenté la structure du manteau le 21 mars 1963. La partie intéressante est la partie superficielle de la couche. Les colonnes de glace proviennent du gel de l'eau de pluie, et de l'eau de fusion superficielle.

(Suite dans notre prochain numéro.)