

L'ÉTUDE SCIENTIFIQUE DE LA NEIGE ET LES RÉSULTATS OBTENUS DANS LES PYRÉNÉES

THE SCIENTIFIC STUDY OF SNOW AND THE RESULTS OBTAINED IN THE PYRENEES

English synopsis p. 672

par C. SULZLÉE

Officier Ingénieur des Eaux et Forêts à Pau

Il est curieux de constater que jusqu'à ces dernières années la neige n'avait fait l'objet d'aucune étude vraiment scientifique. Les premiers qui eurent l'idée de s'attaquer à ce problème furent les Ingénieurs du Service Forestier de Suisse. Ils furent conduits à cette étude par la constatation que les moyens empiriques utilisés jusqu'ici dans la lutte contre les avalanches s'étaient révélés notoirement insuffisants, sinon parfois décevants. L'étude de la neige se révèle d'ailleurs beaucoup plus complexe qu'on aurait pu le penser tout d'abord et les forestiers suisses durent bientôt faire appel à des savants de disciplines différentes. C'est ainsi qu'une commission suisse pour l'étude de la neige et des avalanches fut constituée en 1931 sous la Présidence de l'Inspecteur des Eaux et Forêts PETIT-MERMET, et que prirent part aux travaux de la Commission : deux cristallographes de l'Institut minéralogique de l'École Polytechnique de Zurich, deux ingénieurs de l'Institut géologique et les savants de l'Observatoire Physiométéorologique de Davos.

Cette collaboration de différents techniciens et savants aboutit ensuite à la création de l'Institut Fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches installé à Weissfluhjoch, et dépendant de l'Administration Fédérale des Forêts Suisse.

Le présent exposé a pour but d'indiquer les principes fondamentaux sur lesquels est basée l'étude rationnelle de la neige et de faire connaître les premiers résultats obtenus sur le plan technique dans les Pyrénées.

PRINCIPES FONDAMENTAUX

La cristallographie de la neige :

La cristallographie de la neige a été étudiée sur le terrain, mais surtout au laboratoire, en s'efforçant d'y réaliser des conditions analogues aux conditions naturelles. Le problème est dominé par l'évolution des cristaux de neige. Un cristal de neige sec à basse température présente au moment de sa chute, une forme très compliquée, avec des aigrettes et de très fines dentelures. Ces dentelures s'arrondissent et finissent par s'estomper presque complètement, donnant un petit grain de neige arrondi. Cette évolution

CRISTAUX DE NEIGE

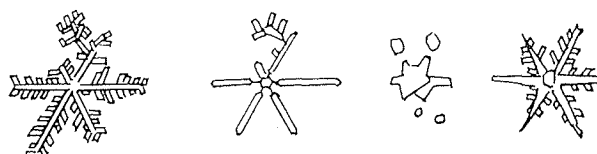


Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 4

Fig. A

Fig. 1 : cristal de neige au moment de sa chute.
Fig. 2 : le même cristal après 15 jours de séjour à -5° .
Fig. 3 : le même cristal après 40 jours de séjour à -5° .
Fig. 4 : cristal de neige après 80 jours de séjour à -78° .
Grossissement : 6 fois environ.

est d'autant plus rapide que la température est plus élevée, mais elle a toujours lieu, si basse

que soit la température (par exemple à -78° elle est sept fois plus lente qu'à -5°).

Cette transformation des cristaux est d'ailleurs fonction aussi de la perméabilité à l'air de la neige.

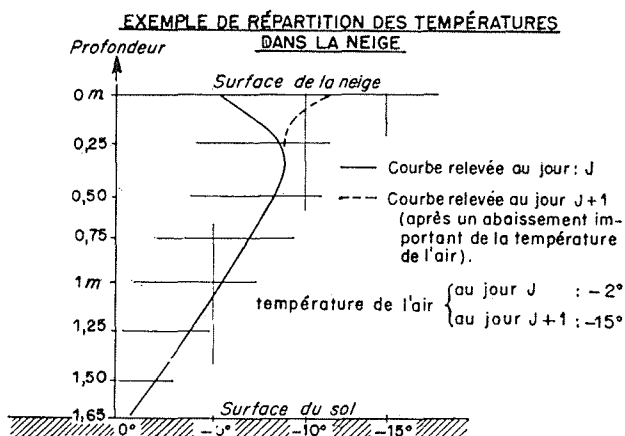


Fig. B

La température de la neige :

Cette notion, comme on vient de le voir, est très importante par suite de l'influence de la température sur les métamorphoses cristallographiques de la neige. La répartition des températures en profondeur se fait suivant une courbe qui a toujours la même forme générale. Cette répartition dépend de la double influence de la température du sol et de celle de l'air extérieur. Le sol agit comme un élément stabilisateur, la température au sol étant toujours assez voisine de 0° . Au contraire, l'air extérieur présente de fortes variations de température. Celles-ci influent de manière différente suivant leur amplitude. Les variations de températures diurnes ne se transmettent que jusqu'à 25 cm. de profondeur, car la neige a une conductibilité thermique particulièrement faible. Les variations de la température de l'air qui ne changent pas de sens pendant plusieurs jours finissent par agir à une profondeur plus grande et provoquent ainsi le décalage de la courbe de répartition de température.

Grâce à la faible conductibilité thermique de la neige, les changements de température à l'intérieur de la masse de neige ne se font que très lentement. C'est ce qui rend possible l'étude de la métamorphose de la neige et les applications qui en découlent.

La densité de la neige :

La densité de la neige est aussi une des caractéristiques essentielles de l'étude de la neige.

Cependant, à ma connaissance, il n'existe pas de relations fixes entre l'ensemble des caractéristiques de la neige et sa densité. Cependant la densité est liée plus ou moins étroitement à la perméabilité à l'air de la neige.

La perméabilité à l'air :

La perméabilité à l'air intervient notablement pour rendre plus ou moins faciles les courants verticaux ascendants ou descendants qui se produisent à l'intérieur de la neige. C'est ainsi que le sol étant généralement à une température supérieure à celle de la neige, il se produit à travers la couche de neige un courant ascendant d'air relativement chaud.

Cette tendance à l'élévation de température de la couche de neige, est contre-balançée par une tendance générale au refroidissement, l'air extérieur, au-dessus de la surface de la neige étant le plus souvent, ou tout au moins pendant la plus grande partie de la journée, plus froid que la neige. Cette influence explique la forme générale de la courbe de température de la neige, l'influence du courant ascendant venant du sol s'estompant de plus en plus à mesure que l'on se rapproche de la surface extérieure de la neige.

À côté des courants d'air verticaux existent aussi des courants horizontaux dont la présence a été décelée par la comparaison de profils de température.

Enfin, l'état hygrométrique de l'air inclus dans la neige est influencé par ces courants ; c'est ainsi qu'un courant chaud ascendant venant du sol provoque des condensations sur les masses plus froides qu'il rencontre en s'élevant.

La mécanique de la neige :

La neige comme un matériau quelconque possède ses propriétés mécaniques, dont l'importance est fondamentale. La neige, matériau plastique, possède en chaque point d'une couche un maximum de résistance à la compression et à la traction. Si la couche est soumise à un effort de compression ou de traction supérieur à chacun des maxima de résistance, il y aura déséquilibre et rupture de la couche. Il faut soigneusement distinguer entre : les efforts internes (de traction ou de compression) réellement subis en un point d'une couche de neige, et l'effort maximum de résistance (à la traction ou à la compression). C'est quand le premier de ces efforts atteint la limite maximum (pour un état de neige donné) qu'il y a état d'équilibre instable de la neige et danger d'avalanche.

En ce qui concerne les efforts réels de trac-

tion, on a constaté que, sur un versant enneigé, ils varient en raison directe de la pente du terrain et sont maxima dans les parties convexes du profil du versant, les parties concaves ou les replats, étant au contraire des zones de compression.

La plasticité de la neige :

Le fait que la neige est un matériau « plastique » modifie grandement les données de l'étude de la mécanique de la neige. Les couches de neige s'étirent d'autant plus qu'elles

sont soumises à des efforts de traction plus élevés.

La conséquence la plus visible de la plasticité de la neige est le mouvement de reptation. Chaque point de la couche de neige est animé d'un mouvement qu'on peut décomposer suivant deux directions, l'une verticale, l'autre suivant la pente du terrain. Il est évident que la composante verticale, ou tassement, est d'autant plus grande que le point considéré est plus haut dans la couche. Mais le mouvement suivant la pente suit la même loi. Sur un sol irrégulier, le mouvement de reptation au sol est nul. Sur un sol

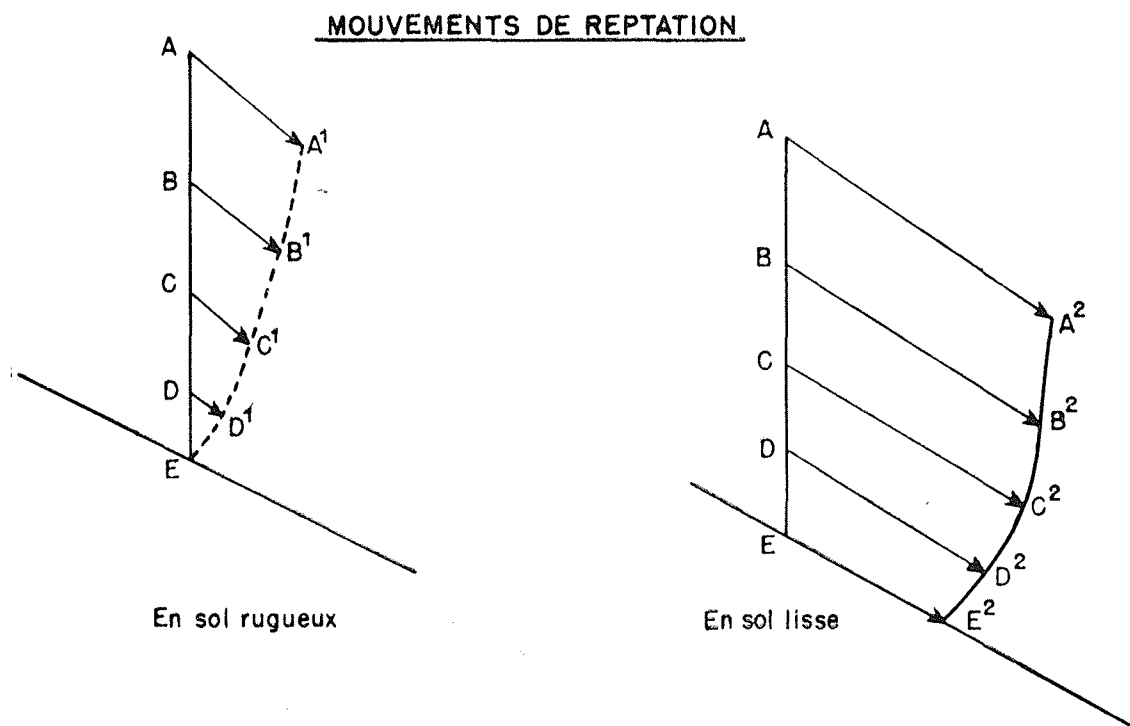


Fig. C

permettant le glissement de la neige, le mouvement de reptation le long du sol est appréciable, mais cela ne modifie pas les principes énoncés plus haut sur le mouvement relatif de reptation des différents points de couche. Ajoutons que le mouvement de reptation peut atteindre facilement 25 cm. par jour.

La discontinuité du manteau de neige :

Il est très important de constater que chaque chute de neige forme un élément de la couche de neige distinct des autres.

Cette différenciation existe au départ parce que la neige, suivant les cas, tombe sous des

formes bien différentes (par exemple chute de neige sèche à basse température, ou, au contraire, chute de neige lourde mouillée, à gros flocons). On constate que cette individualisation demeure pendant tout l'hiver, chaque couche continuant son évolution propre quelle que soit l'importance des transformations qu'elle subit. (On retrouve ainsi avec netteté les surfaces de séparation des couches après plusieurs semaines.) Les propriétés cristallographiques varient aussi d'une manière discontinue en fonction de la profondeur. Cette discontinuité se manifeste également dans les profils de cohésion, mais ne se retrouve cependant pas dans les profils de température.

Les facteurs extérieurs :

Les facteurs extérieurs jouent un grand rôle dans la métamorphose de la neige, ce sont d'une part :

1° Le profil du terrain, les accidents de celui-ci (rochers, gazon, etc...), sa nature, son exposition, etc... ;

2° Les facteurs météorologiques.

Ces derniers constituent les causes premières qui agissent sur la neige et en modifient ses caractéristiques. Les principes énoncés plus haut mettent en lumière le mécanisme suivant lequel la neige se métamorphose. C'est ainsi qu'une étude complète des éléments météorologiques est à la base de toute étude sur la neige. Les éléments les plus importants à noter sont : l'enregistrement de la température de l'air, de la direction et de la vitesse du vent, de l'ensoleillement et des radiations solaires, de la pression atmosphérique, de l'état hygrométrique de l'air.

Résultats obtenus :

Je résumerai ici sommairement les résultats obtenus au cours des études commencées dans les Pyrénées depuis l'hiver 1946-47. Ces études n'ont pas eu un but scientifique, mais seulement technique sinon pratique. Je n'ai pas cherché en effet à obtenir des résultats scientifiques, mais simplement à mettre en application les principes suisses, et, en utilisant des méthodes et des appareils analogues aux leurs, à déterminer des moyens pratiques de se protéger contre les avalanches.

Au cours de ces études, je me suis assigné les trois objectifs suivants :

1° En utilisant les résultats obtenus par les Suisses au point de vue scientifique, continuer à vérifier si en gros, ces résultats s'appliquent aux conditions d'enneigement des Pyrénées ;

2° Etudier l'action des différents types d'ouvrages de protection sur les caractéristiques de la neige, afin d'arriver à déterminer dans chaque cas particulier, l'emplacement, la nature et la dimension des ouvrages à construire pour la protection contre les avalanches ;

3° Rassembler une documentation permettant de mettre au point une méthode simple et pratique sur la prévision du danger d'avalanche. L'obtention de ce dernier but permettrait l'application en France des méthodes de déclenchement artificiel des avalanches, qui sont maintenant de pratique courante en Suisse.

C'est donc surtout sur le deuxième objectif (action des ouvrages sur la modification des

caractéristiques de la neige) qu'ont porté les observations. Cette étude était possible, sans la mise en œuvre de moyens scientifiques importants, puisque l'essentiel des investigations sur le terrain consistait dans des sondages par battage, à l'aide des appareils que j'avais fait construire en 1946.

I. — ETUDE D'UNE TERRASSE CLASSIQUE.

Des séries de sondages ont été effectuées sur une terrasse en maçonnerie de pierre sèche, au niveau du parement intérieur des murs en pierres sèches, et ont été poursuivies en amont de celui-ci jusqu'à une distance suivant l'horizontale de 49 mètres.

Le graphique ci-joint correspond à l'une des séries de sondages : celle effectuée le 5 mars 1948. L'examen de ce graphique permet de constater qu'il y a deux zones distinctes dans la couche de neige étudiée. La première zone, qui comprend les profils de A à G révèle notamment l'influence de la terrasse sur la couche de neige. Dans la seconde (profils de H à O) c'est au contraire l'influence du terrain qui explique les résultats obtenus.

En effet, dans la première zone, nous avons un « coefficient de résistance au battage moyen par profil », c'est-à-dire en gros une cohésion (puisque cohésion et résistance au battage ont des variations analogues) qui augmente pendant les deux premiers mètres et diminue ensuite légèrement jusqu'au profil F. Dans la seconde zone où l'on s'éloigne de plus en plus de la terrasse, l'influence de celle-ci semble n'avoir pas d'effets directs sur la cohésion de la neige, tout au moins pour des épaisseurs aussi faibles que celles qui existaient au moment où le relevé a été fait. Aussi c'est l'influence du relief qui explique les variations observées.

Les observations forcément longues, ont dû être effectuées à partir de 9 heures du matin et jusqu'à 13 heures. Le soleil s'étant levé vers 9 heures et la neige étant à ce moment-là tôle, il y eut au fur et à mesure que le soleil montait à l'horizon un ramollissement plus ou moins profond de la neige en surface. Pour avoir des points de comparaison exacts, le coefficient de résistance au battage, qui a été trouvé pour les couches situées immédiatement en dessous de la couche supérieure ramollie, a été adopté également pour la couche supérieure, de manière à obtenir, en tous les points, le profil exact qui aurait été levé si l'on avait pu effectuer tous les sondages à 9 heures du matin. Sur les profils de battage, la ligne en pointillé indique le profil relevé effectivement

sur le terrain, tandis que le trait plein indique pour les couches supérieures le profil ramené à 9 heures du matin. Pour les profils A à G aucune correction n'a été faite, le soleil très bas sur l'horizon au début de la matinée n'ayant pas encore eu d'action à ces emplacements au moment où les sondages ont été effectués.

On peut observer qu'au point L existe un point « convexe » dans le profil du terrain tandis qu'au point I existe au contraire un point « concave ».

D'autre part, entre L et O la pente du sol

est nettement plus faible qu'en aval. Entre les profils G et K on a une hauteur de neige bien plus forte que dans la partie amont. Cela provient vraisemblablement du tassement plus grand de la neige qui, descendant par son mouvement de reptation de la partie amont, a été tassée, freinée et comprimée par l'action de l'ouvrage situé en aval. Au contraire, dans la partie supérieure, la couche de neige est moins épaisse, et au point L, et dans la zone avoisinante, elle passe par un minimum de hauteur. Ce point convexe, en effet, suivant les obser-

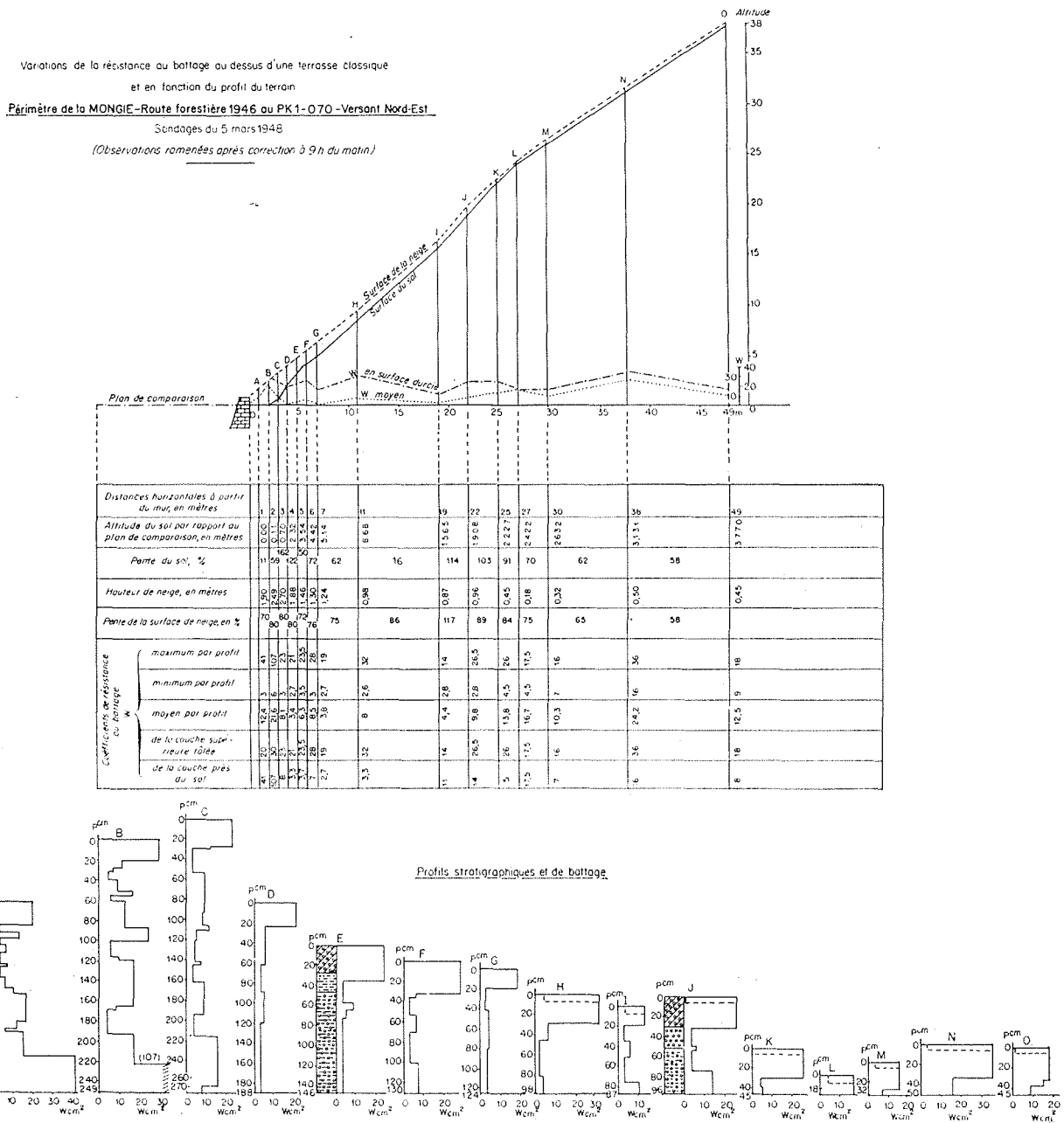


Fig. D

vations des Suisses, constitue une zone où l'effort de traction est maximum, il y a donc étiement des couches. On remarquera aussi que la cohésion moyenne de toute la zone GO est particulièrement élevée. L'examen des profils stratigraphiques révèle que le coefficient élevé provient seulement du durcissement de la couche supérieure. Lorsque la couche totale est mince, ce qui est le cas des profils situés dans la partie convexe (KLM), toute la couche bénéficie de cette augmentation de dureté. Lorsqu'au contraire la couche est plus épaisse (ce qui est le cas des profils G et H par exemple) seule la partie supérieure du manteau de neige donne un profil stable, et la partie inférieure au contraire (ce qui est très net dans le profil G) n'a qu'une cohésion faible et n'est pas à l'abri du danger d'avalanche. Une couche telle que celle du profil G ou du profil D risque de voir sa cohésion disparaître complètement par suite d'un échauffement de température qui amollirait les 20 à 30 cm. de la partie supérieure. A ce moment-là il y aurait grand danger d'avalanche, avalanche qui ne peut se produire dans le cas présent à cause de la présence de l'ouvrage de retenue situé en aval, ouvrage qui augmente la cohésion des couches sur toute la hauteur du manteau de neige (profils A, B et C notamment). Les études sur le terrain ont été jusqu'ici trop peu nombreuses pour permettre d'en tirer des résultats complets; cependant, les résultats suivants peuvent être mis en évidence :

1° La plate-forme rompt la continuité des couches de neige, elle réduit les efforts de traction interne de la partie du manteau de neige située au-dessus d'elle (ce qui s'explique par la diminution de l'effort dirigé vers le bas dû au poids des couches de neige) ;

2° La plate-forme tend à comprimer les couches de neige au-dessus d'elle, cet effort de compression (dirigé de bas en haut) tend encore à diminuer les efforts de traction (dirigés de haut en bas) dans les couches ;

3° La profondeur de neige est toujours beaucoup plus élevée au-dessus de la plate-forme que dans la couche naturelle. La plate-forme a donc un effet néfaste dans un sens parce qu'elle provoque une accumulation de neige, mais heureux aussi, car elle retient cette neige dans le haut des versants. Il faut noter cependant que, en cas de comblement de la plate-forme, et formation de neige tôleée en surface, la surface tôleée constitue un danger supplémentaire d'avalanche pour toute couche de neige sans cohésion qui viendrait se placer au-dessus.

Mais ce danger ne peut exister que dans le cas d'enneigement important ;

4° A des profondeurs égales ou comparables à celles des couches naturelles situées en amont, le coefficient de résistance au battage est plus élevé à l'emplacement de la plate-forme que dans les couches naturelles situées en amont. Cette augmentation donne à la masse de neige qui couvre la plate-forme une stabilité beaucoup plus grande, si bien que cette neige amoncelée sur la plate-forme joue un rôle de retenue important vis-à-vis des couches supérieures situées en amont ;

5° Sauf cas exceptionnels, les départs d'avalanches ont eu lieu en dessous des plates-formes d'avalanches et non au-dessus; les crevasses observées dans la neige au-dessus des plates-formes n'ont pas donné lieu à des avalanches, bien que les sondages aient révélé en ces endroits des profils de neige caractéristiques du départ des avalanches ;

6° Les études effectuées permettent d'orienter en connaissance de cause les recherches à faire dans les hivers suivants. Il faudra, en effet, confirmer les résultats déjà acquis, et étudier notamment en détail l'action du « retalutage » du déblai amont de la plate-forme qui semble créer une zone de neige de moindre résistance.

En conclusion, **la plate-forme**, ouvrage classique de protection contre les avalanches, agit non seulement en réduisant la pente d'un versant abrupt, en créant une concavité propice à l'ancrage des couches de neige, mais elle agit aussi directement sur la structure interne du manteau de neige, provoquant certes une accumulation de neige, mais réduisant les efforts de traction internes dans les couches, et augmentant considérablement les coefficients de résistance ou battage, donc les cohésions, par rapport aux couches naturelles situées en amont.

II. — ETUDE D'UN PONT A NEIGE.

Il a été construit à la Mongie à titre d'essai, en 1947, un pont à neige constitué par des rails métalliques légèrement inclinés sur l'horizontale, et laissant entre eux un intervalle de 15 cm. environ. Des mesures de cohésion ont été effectuées en aval, au-dessus, et en amont de cet ouvrage. Ces mesures n'ont pu être encore absolument probantes, étant donné le faible enneigement de l'hiver 1947-48 (photos 1, 2 et 3).



Photo 1

Pont à neige construit à titre d'essai en 1946 dans le périmètre de protection contre les avalanches à La Hougie (ouvrage PK. 1750)

(Cliché Sulziée)



Photo 2

Vue du même ouvrage en hiver montrant les formations de glace à la base des rails, formations provenant :

- 1°) de la conductibilité thermique des rails ;
- 2°) du freinage apporté au mouvement naturel de reptation de la neige.

(Cliché Plandé)

D'autre part, cet ouvrage ayant été construit, non seulement à titre d'essai, mais aussi pour la protection contre les avalanches d'un couloir particulièrement dangereux, il n'a pas été possible de déterminer son emplacement de manière à pouvoir expérimenter au mieux les variations de cohésion de la neige ; et cependant, puisque c'était là le seul ouvrage de cette nature qui était pour l'instant à ma disposition, j'ai essayé d'en tirer le meilleur parti possible.

Les séries de sondages les plus caractéristiques sont celles du 1^{er} février 1948, et celles du 7 février 1948 (fig. E). On voit que les profils situés en aval de l'ouvrage révèlent une cohésion infime. Seule la partie supérieure tôlee a une certaine cohésion, mais c'est là un état précaire comme je l'ai exposé plus haut. Les profils D, E, F qui sont encore au-dessous de la surface



Photo 3

Vue de la sonde de battage utilisée pour les relevés de profils stratigraphiques, et du densimètre utilisé pour mesurer les densités de la neige aux différentes profondeurs. Cet appareil nécessite le creusement préalable d'une tranchée dans la neige, pour le prélèvement des « carottes » de neige à diverses profondeurs.

(Cliché Plandé)

Centre d'études
des avalanches
de la MONGIE

Séries de profils de battage pour l'étude d'un pont à neige
Périmètre de la MONGIE
(Ouvrage 1947 du PK 1750)

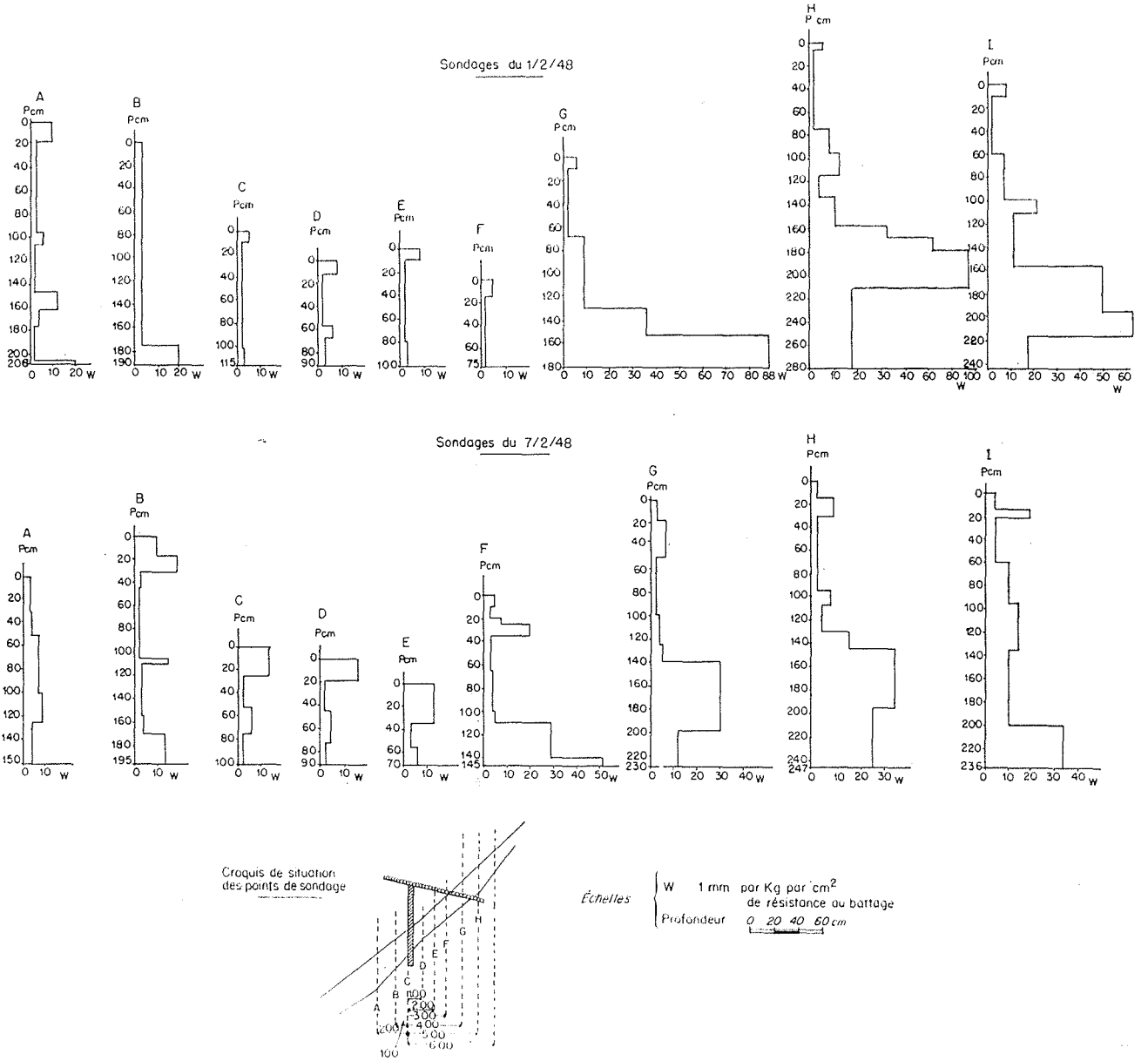


Fig. E

du pont de neige présentent aussi une cohésion faible ; au contraire, les profils G, H, I qui ont subi directement l'influence de la surface des rails, présentent une forte cohésion. Cela prouve que des surfaces, même à claire-voie, agissent quand même efficacement pour augmenter la compression de la neige. Il faut noter que les hauteurs de neige sont beaucoup plus faibles immédiatement en dessous de l'ouvrage (profils

C, D, E) que dans la couche naturelle située en aval (profils A et B) et à plus forte raison que dans la couche modifiée par l'ouvrage et située en amont (profils G, H, I). L'influence du vent semble ici avoir été prédominante. Le pont à neige détermine en effet des resserrements de courants d'air aussi bien entre les rails que dans l'espace en forme de sifflet situé entre le terrain et les rails. Il y a donc une action cons-

tante de déblaiement, action qui semble à priori devoir jouer un rôle utile, puisqu'elle éviterait le comblement de l'ouvrage par la neige.

D'autre part, dans un couloir d'avalanche, il y a toujours intérêt à éliminer le maximum de neige possible, puisque plus il y aura de neige, plus le danger d'avalanche sera élevé.

La reptation des neiges joue un rôle aussi dans le cas du pont à neige et se révèle par la présence de blocs de glace situés à la base des rails à l'endroit où ils entrent en contact avec la couche de neige. Cela nous montre que ces rails provoquent un tassement et un durcissement considérable de la neige.

Il sera intéressant de faire des expériences avec des écartements de rails variables, de manière à déterminer l'écartement optimum. Il y a en effet intérêt à écarter les rails au maximum pour économiser le plus possible dans la construction de l'ouvrage.

Il est également à noter que le pont à neige, par sa forme à claire-voie, provoque une diminution de vitesse dans le mouvement de reptation de la neige. Le déclenchement des avalanches de planche de neige est facilité par l'accélération du mouvement de reptation dans les parties du versant situées immédiatement en aval des parties convexes. C'est d'ailleurs pourquoi ces zones sont spécialement des points de départ pour les avalanches de plaque. L'ouvrage étudié avait été spécialement placé au niveau d'une telle zone et au cours de l'hiver 1947-48, une avalanche s'est déclenchée dans ce couloir, mais au-dessous de l'ouvrage, alors que l'emplacement habituel de déclenchement était en amont de l'ouvrage.

En conclusion, on voit que le pont à neige, qui est un ouvrage à claire-voie, semble jouer sur l'augmentation de compression de la neige un rôle à peu près équivalent à celui d'une terrasse. En soulageant la neige dans son effort de traction, sans rompre la continuité de la couche de neige, le pont à neige au contraire pourra jouer un rôle des plus utiles pour empêcher les avalanches de plaque qui sont dues à une augmentation anormalement élevée dans l'effort de traction que subit la couche de neige, et à une accélération relative du mouvement naturel de reptation.

Enfin, le pont à neige a sur la terrasse classique l'avantage de ne pas être comblé par la neige soufflée apportée par le vent, alors que la terrasse constitue facilement une zone d'accumulation par la neige apportée par le vent. Le pont à neige constitue au contraire une zone d'ablation, et son efficacité dans les zones soumises au vent semble donc devoir être plus grande.

III. — ETUDE DE PALISSADES GRILLAGÉES.

J'ai pu établir, également en 1947, à la Mongie, quelques palissades grillagées. Les sondages faits au niveau de celles-ci ont révélé qu'elles augmentaient aussi la cohésion de la neige pour toutes les parties du manteau de neige situées en amont. Il y a là aussi une série d'expériences intéressantes à continuer, si des moyens suffisants peuvent être affectés à ces recherches.

La palissade grillagée est en effet très économique au point de vue de sa construction et de l'achat des matériaux qui la constituent. Elle joue un rôle assez considérable au point de vue du vent, mais elle a aussi une action indéniable sur la modification de la cohésion de la neige.

IV. — OBSERVATION DES SUITES CHRONOLOGIQUES DES PROFILS DE BATTAGE.

La prévision du danger d'avalanches dépend, comme on le sait, de deux ordres d'éléments : de facteurs fixes qui résultent des conditions topographiques, de la nature du sol et de la végétation qui le couvre, et aussi de facteurs variables tels que les variations de facteurs météorologiques, et surtout les variations des caractéristiques mécaniques et physiques des différentes couches du manteau de neige. Les suites chronologiques des profils de battage sont à la base même de toute méthode de prévisions d'avalanches. Quatre stations ont été retenues lors de l'hiver 1947-48 pour ces observations. Les relevés des profils ont été effectués en moyenne une fois par semaine. Ces relevés ont été complétés par des mesures de températures, ainsi que par l'observation des chutes de neige.

Les observations faites jusqu'ici permettent d'étudier les variations des caractéristiques de la neige dans les différents secteurs de la région de Barèges, et elles constitueront la première étape de la documentation scientifique sur l'enneigement de cette contrée.

V. — AUTRES OBSERVATIONS.

J'ai commencé également quelques sondages de la neige dans les couloirs d'avalanches ainsi que sur des versants d'expositions variées, afin d'avoir des éléments de comparaison et de réunir le maximum de documentation, mais ces observations ne sont pas encore suffisamment nombreuses pour en tirer des résultats.

CONCLUSION

Il résulte des études de neige faites jusqu'ici que, à mesure que l'on avance dans ces études, on s'aperçoit de plus en plus de l'intérêt et de l'utilité qu'elles ont. On peut dès maintenant se rendre compte que d'ici peu de temps il sera possible de définir les règles précises sur les divers types d'ouvrages à adopter pour la protection permanente contre les avalanches. On obtiendra ainsi une efficacité beaucoup plus grande des travaux de protection et l'on réalisera une économie très sensible dans la construction des ouvrages.

En ce qui concerne la prévision du danger d'avalanches, les études seront plus difficiles et plus longues. Les éléments météorologiques ont une grosse importance pour ces prévisions. Il faut donc que, dans ce cas, la station d'études de neige soit dotée d'instruments météorologiques enregistreurs.

En France, le premier centre d'application a été créé à Barèges sous la direction technique de la Station de Recherches de l'Administration des Eaux et Forêts.

Ce centre, financé par l'Administration des Eaux et Forêts et le Comité de Tourisme des Hautes-Pyrénées, dispose de deux postes d'observations fixes (poste d'Ayré à Barèges, et poste de la Mongie) ; il a étendu son activité au département des Hautes-Pyrénées, et, depuis janvier 1949 à l'ensemble des Pyrénées.

Il est hors de doute que si des moyens financiers suffisants sont consacrés à l'équipement et au fonctionnement du Centre d'études des Pyrénées celui-ci arrivera à mettre au point dans quelques années des méthodes de protection contre les avalanches, aussi bien en ce qui concerne la protection permanente par des ouvrages fixes, que la protection intermittente des itinéraires de montagne, qui sera désormais possible, comme en Suisse, grâce aux procédés de prévision scientifique des avalanches.

DISCUSSION

M. le Président remercie M. SULZLEE et donne la parole à M. MEYER-PETER.

M. MEYER-PETER dit que, puisque les travaux en Suisse ont été mentionnés, il lui sera peut-être permis de faire

quelques observations. On a commencé les études sur les qualités de la neige en 1936, en se basant sur certaines analogies entre la mécanique des neiges et celle des terres. La section de mécanique des terres de son Laboratoire s'est occupée de ces questions, d'abord sur le toit de l'Institut Météorologique à Davos, ensuite à l'aide des subsides obtenus de la Commission Suisse des neiges et avalanches, dans une installation provisoire à Weissfluhjoch, altitude 2.700 m. Tout d'abord on s'est occupé de déterminer la cohésion, définie par la résistance au cisaillement, d'une section non soumise à une compression normale. On a découvert la métamorphose du matériau, ce qui a conduit à la collaboration avec les minéralogistes. Il a fallu créer un laboratoire, toujours à Weissfluhjoch, muni de tous les instruments pour mesurer la granulométrie, la résistance à la compression et à la traction au cisaillement, etc., en fonction de la température, ce qui demanda l'installation de chambres à température réglable. En même temps on fit des mesures dans la couverture de neige ; les sondages par battage se révélèrent comme excellent moyen pour déterminer la qualité de la neige et pour déceler des surfaces de discontinuité qui donnent presque toujours lieu à la naissance des avalanches. Les profils de « reptage » décelés en nature sont presque triangulaires (théoriquement paraboliques), il est possible, d'après M. HAEFELI, de calculer les tensions intérieures dans la neige en partant de l'état de déformation. La méthode développée par M. BUCHER considère le « reptage » comme mouvement d'un liquide visqueux. La détermination de la viscosité est alors importante. Au point de vue de la répartition des tensions, M. MEYER-PETER distingue entre les zones neutres, celles qui subissent des tractions et les zones comprimées. Au voisinage des murs de protection contre les avalanches, la zone de compression est très courte, 3 à 4 fois la hauteur du mur. C'est ainsi qu'il est un peu étonné que M. SULZLEE ait pu constater des différences notables entre les cohésions en amont et en aval des ouvrages.

La question est encore ouverte de savoir si l'on peut prendre en considération la résistance à la traction de la neige dans l'établissement des projets de travaux de protection, car cette résistance tombe presque à zéro au moment de la fonte des neiges. Cette question est d'ailleurs importante au point de vue de l'emplacement des ouvrages et de l'emploi de murs ou de râteaux isolés au lieu d'ouvrages continus.

M. SULZLEE répond en constatant que l'on obtient des résultats semblables dans la détermination par deux méthodes différentes de l'effet mécanique des ouvrages sur la neige : la méthode des fils horizontaux, employée en Suisse et mentionnée par M. MEYER-PETER, et la méthode de résistance au battage, employée par M. SULZLEE dans les Pyrénées, montrent que l'influence se produit en amont de l'ouvrage, à une distance égale à cinq ou six fois la hauteur de celui-ci. D'autre part, l'Institut de Weissfluhjoch n'a pas fait ces comparaisons au-dessus et en amont de l'ouvrage, car, contrairement à ce qui se passe dans les Pyrénées, cet Institut travaille sur des champs horizontaux.

Un voyage dans les Pyrénées de certains membres de l'Institut de Weissfluhjoch est prévu prochainement, pour permettre aux chercheurs pyrénéens de travailler en liaison avec cet organisme.

ALLOCUTION DE M. LE PRÉSIDENT BARRILLON

Les « Journées de l'Hydraulique » à proprement parler, sont maintenant terminées, et nous pouvons en tirer les conclusions.

Dans ces « Journées de l'Hydraulique » qui ont été imaginées par votre Président M. MILON, il y a deux points brillants qui sont la visite du Laboratoire de Chatou, qui a été certainement une révélation pour beaucoup d'entre vous, et la communication de M. MEYER-PETER.

Je ne reviendrai pas sur ces deux points, mais je crois que nous ne pouvons pas terminer nos assises sans dire quelques mots des différents travaux qui ont été présentés, et des résultats auxquels on est arrivé.

Le premier travail est celui de MM. FORTIER et COMOLET, qui se sont attaqués à un problème qui avait déjà passionné beaucoup de chercheurs : celui de reculer la limite du nombre de Reynolds qui sépare les régimes laminaires des régimes turbulents, dans le cas d'écoulement dans les tubes lisses. Avec un dispositif expérimental excessivement simple, MM. FORTIER et COMOLET sont arrivés à des résultats très importants. Ils ont je pense, battu le record des nombres de Reynolds et ceci leur a permis, en même temps, de découvrir un certain nombre de précautions expérimentales qui semblaient avoir été négligées par tous les observateurs anciens.

Je crois que c'est là une communication intéressante et qui va remettre cette question à l'actualité.

Dans la deuxième communication, M. FONTAINE a rappelé avec une grande largeur de vues et avec une entière équité, les avantages et les inconvénients de la méthode thermométrique Poirson. Il nous a dit, d'une façon excessivement nette : Cette méthode donne d'excellents résultats dans tel et tel cas. Elle donne des résultats douteux dans tel et tel autre. Et enfin, il y a des cas où elle est absolument inapplicable.

A l'heure actuelle la méthode thermométrique ne peut pas concurrencer les autres méthodes de mesure de débits, mais elle permet de suivre certaines installations en service d'une façon continue.

La troisième communication était celle de M. VALEMBOIS, sur la détermination des caractéristiques de la houle. Les appareils de M. VALEMBOIS sont très intéressants ; l'esprit dans lequel ils nous ont été présentés l'est aussi. Nous voyons un chercheur et un organisme très développé qui font des recherches et qui, en même temps, communiquent les résultats de ces recherches aux concurrents. Nous sommes, ici, à la « Société Hydrotechnique de France », tout à fait dans cet ordre d'idées ; si nous travaillons en commun, c'est avec l'espoir que tous ceux qui font des travaux intéressants veuillent bien les communiquer, avec un esprit scientifique désintéressé, faisant part des difficultés qu'ils ont rencontrées, ce qui permet un travail efficace et une collaboration dans un excellent esprit scientifique.

Dans la discussion du mémoire de M. VALEMBOIS, il y

a un point qui a été laissé de côté, et qui nécessite quelques réflexions. Le problème qui se pose est le suivant : Est-il plus avantageux d'avoir un appareil qui coûte 12 millions et qui donne des observations en un seul point, ou vaut-il mieux avoir trois appareils coûtant quatre fois moins cher, et qui font des observations simultanées en plusieurs points ?

Sur le réglage automatique des vitesses des turbines, nous avons deux mémoires de M. GADEN et de M. ALMERAS, sur lesquels M. GARIEL a déjà présenté un exposé d'ensemble auquel je m'associe complètement. Je signalerai seulement qu'il y aurait intérêt à uniformiser les notations, pour faciliter le travail des lecteurs.

M. GADEN, d'ailleurs, a fait une proposition au sujet de la diminution du Pd^2 dans les turbines. Il nous a fait espérer qu'on ferait des économies de poids, par la suite. Cette question est entièrement en relation avec l'ampleur de l'interconnexion, etc., et je crois qu'il y aura lieu pour la Commission des machines, dont dépend cette question, de rédiger un texte ou de provoquer par exemple la réunion d'une sous-Commission pour laquelle, peut-être, M. DARRIEUS voudrait bien accepter la présidence, sous-Commission qui aurait pour but de partir de la constatation que, dans l'état actuel de l'interconnexion, le problème des Pd^2 a changé d'aspect, et de trouver une formule définitive qui mette d'accord les purement hydrauliques et les purement électriques.

La communication suivante est relative à la complexité du phénomène des coups de bélier dans les installations de pompage. M. Paul BERGERON a travaillé sur une question dont le texte lui avait été en quelque sorte imposé. Nous avons pensé que pour nos réunions annuelles, il était bon d'imposer de temps en temps des sujets généraux. Nous avons eu le sujet général des transports solides. Vous pourriez réfléchir à ce que nous pourrions choisir comme sujet général pour l'année prochaine.

Dans la section des « Machines », nous avons discuté sur le thème qui pourrait intéresser le plus grand nombre d'auditeurs. Je donne la parole à M. GARIEL, qui est Président de cette section, pour nous préciser la suite donnée.

M. GARIEL. — Le sujet général qu'on avait décidé d'adopter, était : « Influence du progrès des connaissances dans l'étude des coups de bélier sur l'évolution des machines hydrauliques », ce qui était aussi bien les turbines que les pompes.

Comme l'étude sur les régulateurs et l'étude des progrès de la connaissance des coups de bélier, sa réaction sur les turbines hydrauliques, les deux rapports de M. GADEN et de M. ALMERAS étaient bien dans ce cadre, pour les turbines hydrauliques.

M. BARRILLON. — M. BERGERON a traité ce sujet d'une façon magistrale, je dirais même un peu émouvante pour ceux qui ont reconnu dans son exposé les idées, la

voix presque de son père, que nous regrettons infiniment ici, puisque c'était le prédécesseur de M. GARIEL, comme Président de la Commission des « Machines ».

Cette méthode graphique a d'ailleurs eu une autre illustration dans une communication excessivement brillante faite par M. ESCANDE, que je ne vous résumerai pas, parce que c'était un véritable feu d'artifice dans lequel il nous a débité, à une allure dont je n'ai pas fait la mesure, une série de questions qui n'auraient certainement pas pu être exposées en un temps comparable à l'aide d'une méthode autre que la méthode graphique.

Ensuite, nous avons eu une communication magistrale de M. MEYER-PETER, que je remercie une fois de plus ; et enfin nous avons eu ce matin des communications sur lesquelles je puis passer rapidement, puisqu'elles résonnent encore dans cette salle : l'une sur « les lois de probabilité des débits » de MM. LE CAM et MORLAT, à la suite de laquelle d'ailleurs, nous avons eu des interventions très intéressantes, en particulier des observations de M. HUPNER, sur la méthode Abott et sur quelques autres méthodes aussi.

Nous avons eu ensuite une communication du spécialiste des fleuves, M. PARDE, qui nous a tenus sous le charme, en nous transportant pendant un certain temps dans la région du haut Mékong, ou du haut Yang-Tsé-Kiang ; et nous sommes redescendus à un niveau plus bas pour une étude de glaciologie qui a été véritablement remarquable. C'est la communication de M. SULZLEE, sur l'étude scientifique de la neige et les résultats obtenus dans les Pyrénées.

Je crois que tous vous vous êtes félicités d'avoir créé une section de « Glaciologie », lorsque vous avez entendu l'exposé de M. SULZLEE, et les commentaires qui ont été donnés, en particulier par M. MEYER-PETER. C'est un sujet dans lequel nous avons naturellement été précédés par les Suisses. La communication de M. SULZLEE marque qu'il y a véritablement beaucoup à faire, et qu'on est entré dans une excellente voie.

PROCLAMATION DU PRIX DE MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE

M. BARRILLON. — Ayant résumé l'ensemble des communications que nous avons eues dans cette semaine, et pour terminer, je dois ouvrir un dossier relatif au « Prix d'hydrologie », dont je vous rappelle l'origine : il y a quelques années, avaient paru quelques monographies, descriptions de bassins, et la Société Hydrotechnique avait pensé qu'il était utile d'établir un plan pour ces monographies. Nous avons pensé que nous devrions fonder un prix destiné à récompenser un jeune homme présentant une thèse de Doctorat sur un sujet de ce genre.

Nous nous sommes adressés à M. DE MARTONNE, pour constituer une Commission qui devait établir le programme de la description de la monographie hydrotechnique, hydrographique, d'un bassin. Nous avons reçu un certain nombre de travaux. Tout ceci s'est passé assez rapidement, et la Commission qui a été chargée d'examiner ces travaux, s'est trouvée en présence de pas mal de descriptions intéressantes, mais qui se présentaient à des points de vue assez différents. Un certain nombre de ces descriptions, de ces monographies de bassins, d'abord n'étaient pas présentées sous forme de thèse. Mais nous avons considéré que ça n'avait aucune importance. Un

certain nombre de ces monographies étaient relatives à des travaux déjà anciens. Elles étaient véritablement en dehors de notre programme ; malgré la valeur des travaux présentés, nous n'avons pas cru que nous pouvions retenir des travaux qui n'étaient pas tout à fait des travaux provoqués par la Commission, ou des travaux suivant exactement le plan de la Commission.

Nous avons eu quatre mémoires relatifs à des bassins métropolitains ⁽¹⁾, et trois relatifs à des bassins coloniaux ⁽²⁾.

D'un côté, nous étions tentés de donner le prix à un travail sur un bassin métropolitain, parce que métropolitains nous-mêmes, et portant sur un sujet d'autant plus difficile qu'il était déjà plus exploré ; mais par ailleurs, nous étions tentés de donner le prix à un travail colonial, puisque c'était là qu'étaient les plus grandes difficultés, étant donné que l'auteur n'avait pas de cartes géologiques bien établies et n'avait pas une documentation ancienne.

Finalement, nous avons décidé qu'on donnerait deux prix : un prix pour les bassins métropolitains, et un prix pour les bassins coloniaux.

Parmi les travaux il s'en est trouvé un remarquable, dû à un concurrent un peu jeune, et nous avons craint qu'en lui donnant un prix, nous arrêtions son ardeur au travail d'où il est résulté que finalement, nous avons donné deux prix, et une mention honorable.

Et finalement, les résultats de ce concours sont les suivants :

Dans la section métropolitaine, le Prix de Monographie de la Société Hydrotechnique de France, pour l'année 1949, est attribué à MM. REMENIERAS et BOYER, pour leur étude sur le bassin de la Maronne. (Applaudissements.)

Une mention est accordée à M. WYART, pour son travail sur le bassin du Guil. (Applaudissements.)

Dans la section coloniale, le Prix est attribué à M. AUVRAY, pour sa monographie du Konkouré. (Applaudissements.)

Ce prix avait été créé pour une année. Néanmoins, étant donné l'importance des résultats que nous avons obtenus, le succès qu'a eu cette idée de M. le Président MILON, nous avons pensé que ce Prix pourrait devenir une tradition à la Société Hydrotechnique. Par conséquent, les mémoires seront encore bien accueillis, seront examinés, seront passés au crible par la Commission présidée par M. DE MARTONNE, et j'espère que par la suite, nous recevrons encore d'importantes monographies sur des bassins fluviaux particuliers.

Ceux d'entre vous qui voudront consulter les travaux récompensés par des Prix, pourront les trouver au Secrétariat.

Je déclare que les « Journées de l'Hydraulique » sont terminées, à mon entière satisfaction et, j'espère, à la vôtre aussi.

(1) Doubs, Fier, Guil et Maronne.

(2) Konkouré, Niger supérieur et « quelques cours d'eau d'Afrique Equatoriale ».