



HAL
open science

Forages glaciaires à grande profondeur.

G. Flusin, M. Bernard

► **To cite this version:**

| G. Flusin, M. Bernard. Forages glaciaires à grande profondeur.. 1909, pp 1-32. insu-00696141

HAL Id: insu-00696141

<https://insu.hal.science/insu-00696141>

Submitted on 11 May 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE
ET DES AMÉLIORATIONS AGRICOLES

SERVICE D'ÉTUDES
DES GRANDES FORCES HYDRAULIQUES
(RÉGION DES ALPES)

ÉTUDES GLACIOLOGIQUES

TIROL AUTRICHIEN

MASSIF DES GRANDES ROUSSES

GRENOBLE

Jules REY, éditeur

PRIX : 15 fr.

1909

Direction des études
des sciences et des arts

Service des études
des grandes forces hydrauliques

ÉTUDES GLACIOLOGIQUES

TIROL AUTRICHIEN

MASSIF DES GRANDES ROUSSES

ÉTUDES GLACIOLOGIQUES

TIROL AUTRICHIEN

MASSIF DES GRANDES ROUSSES

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE

ET DES AMÉLIORATIONS AGRICOLES

SERVICE D'ÉTUDES

DES GRANDES FORCES HYDRAULIQUES

(RÉGION DES ALPES)

ÉTUDES GLACIOLOGIQUES

TIROL AUTRICHIEN

MASSIF DES GRANDES ROUSSES

1909

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
 ET DES AMÉLIORATIONS AGRICOLES
 DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE

SERVICE D'ÉTUDES
 DES GRANDES FORCES HYDRAULIQUES
 (RÉGION DES ALPES)

ÉTUDES GLACIÉROLOGIQUES
 TIRÉE À PART

MANSIF DES GRANDES ROUSSES

1901

TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

ET ORDRE DES PLANCHES ET ILLUSTRATIONS

	Pages
Avant-propos, par M. R. DE LA BROSSÉ.....	1
I. — Forages glaciaires à grande profondeur,	
par MM. FLUSIN et BERNARD.	
<i>Texte.</i> — Introduction et aperçu historique.....	5
Description de l'appareil.....	9
Technique du forage.....	13
Particularités du forage.....	19
Observations techniques et numériques, relatives aux sondages de 1906.....	23
Conclusions.....	28
<i>Illustrations.</i> — Pl. I : pompe d'alimentation et treuil de retenue; moteur rotatif; plateau à engrenages d'angle.	
Pl. II. pompe d'alimentation; tarière hélicoïdale; outils de retenue et de relevée.	
Pl. III : transport par traîneau; positions de forage.	
Pl. IV : commencement du forage; centrage de la glissière.	
Pl. V : suspension du forage; tube à bout de course.	
Pl. VI : disparition de la tarière; montage d'un nouveau tube; reprise du forage.	
Pl. VII : adjonction d'un tube; vissage d'un tube; emplacement du second forage; positions de relevée.	
Pl. VIII : dispositif de relevée; dévissage d'un tube.	
Pl. IX : démontage de l'appareil; station d'hivernage; M. Hess devant l'appareil au repos.	
<i>Dessins de l'appareil.</i> — Pl. I : cadre trapézoïdal et montants de la chèvre.	
Pl. II : élévation générale de l'appareil; treuil de manœuvre.	
Pl. III : appareil rotatif à bras.	
Pl. IV : suspension tournante et bec-raccord; tarière à injection d'eau.	
II. — Études glaciaires, géographiques et botaniques dans le massif des Grandes Rousses,	
par MM. G. FLUSIN, C. JACOB et J. OFFNER.	
<i>Texte</i> — Introduction.....	33
Index bibliographique.....	37
Notice topographique.....	39
Description orographique et hydrographique du massif des Grandes Rousses..	47
Aperçu géomorphologique.....	54
Aperçu phytogéographique.....	59
Description détaillée des glaciers des Grandes Rousses.....	70
Mesures et observations glaciologiques.....	88
Histoire récente des glaciers du massif.....	103
Histoire ancienne des glaciers du massif.....	107

- Panoramas.** — I. Versant occidental du massif des Grandes Rousses, vu du Pic Gros-Coissy.
II. Massif des Grandes Rousses et régions avoisinantes, vus de Roche-Mantel.
III. Versant oriental du massif des Grandes Rousses, vu du Pic du Mas de la Grave.
IV. Glacier de Sarennes, vu du Sommet de Sarennes.
V. Glacier du Grand Sablat, vu de la moraine latérale de la rive gauche.
VI. Glacier des Quirlies et bassin supérieur du glacier des Malatres, vus du front du glacier des Quirlies.
VII. Glacier de Saint Sorlin, vu de la rive droite.
VIII. Glacier de Saint Sorlin et chaînon du Sauvage, vus de la rive gauche du glacier.
IX. Versant occidental du massif des Grandes Rousses et Plateau des Petites Rousses, vus du Signal des Petites Rousses.

- Planches.** — I. Schéma orographique et hydrographique du massif des Grandes Rousses, au 50.000.
II. Schéma des extensions glaciaires les plus récentes, dans le massif des Grandes Rousses.

Annexe. — Carte des glaciers du massif des Grandes Rousses, au 10.000.

AVANT-PROPOS

Le Service d'étude des grandes forces hydrauliques, institué, il y a quelques années, par le Ministère de l'Agriculture, répond véritablement à l'un des besoins de notre temps et témoigne de l'intérêt que ce Ministère porte à tout ce qui concerne le meilleur emploi de nos richesses hydrauliques.

A toute époque, il est vrai, l'Agriculture et ses organes officiels ont dû s'intéresser à l'utilisation des eaux, rechercher les méthodes qui permettent d'en tirer le meilleur rendement, d'en éviter le gaspillage, d'en accumuler les réserves, mais le développement récent des cultures intensives, leur extension sans cesse croissante aux régions sèches et presque arides naguère encore du midi provençal, la multiplication des syndicats et canaux d'irrigation, enfin, récemment, l'essor si remarquable des industries de la houille blanche spécialement dans les Alpes, ont donné au problème de l'utilisation des eaux une importance économique de tout premier ordre.

Ce problème est, d'ailleurs, encore bien imparfaitement résolu : alors que, pendant de longs mois, le lit de certains cours d'eau reste à sec, des crues s'y produisent en d'autres saisons, emportant avec les terres des montagnes les réserves accumulées par les pluies ou les neiges sans profit pour personne. Les lacs qui pourraient, souvent à peu de frais, se transformer en réservoirs magnifiques, sont fort peu utilisés et presque personne ne songe à ces autres réservoirs naturels qui se nomment glaciers et qui constituent cependant, au même titre que les lacs, mais sur une échelle beaucoup plus vaste au moins dans nos Alpes, l'un des principaux éléments de leur richesse. Le touriste qui parcourt, sous le charme d'une nature magnifique, les vallées de la Lombardie, de la Suisse ou les fjords scandinaves, n'y prête souvent qu'une attention superficielle, mais s'il a le temps ou le désir d'étudier, il ne tarde pas à reconnaître, dans l'ingénieux emploi que les habitants de ces contrées ont su faire des eaux de leurs vallées et de leurs lacs, le principal facteur de leur prospérité et le gage probable d'un avenir plus brillant encore. Nos successeurs auront sans doute des motifs d'admiration plus grande s'il leur est donné de voir aménagés en vastes régulateurs hydrauliques les lacs de ces pays, comme on commence à le faire là où les rives ne sont pas déjà occupées par des habitations ou des propriétés qui ne permettent pas d'en surélever momentanément les eaux.

Mais si l'on sait encore si peu profiter des lacs pour arrêter les crues et uniformiser le régime de l'écoulement en toutes saisons, que dire de ces lacs

solides formés de neige et de glace sur lesquels l'homme a eu jusqu'ici si peu d'action ? Ils reculent et diminuent, dit-on, de toutes parts. Les déboisements inconsidérés n'y sont-ils pour rien, qui oserait l'affirmer ? Et si l'on ne voit guère par quels moyens on pourrait agir pour modérer leur fusion, qui, de nos jours, saurait seulement en évaluer le volume et dire quelle sera leur durée ? Beaucoup ont disparu dans les Alpes méridionales, la plupart reculent, fort rares sont ceux qui stationnent ou qui croissent, et ce sont là des variations de surface relativement faciles à constater, quoiqu'on soit encore loin de les bien connaître; on ignore presque tout de leurs épaisseurs.

L'étude des réserves solides des glaciers n'est cependant pas moins utile que celle des réserves liquides des lacs, elle intéresse au même titre tous ceux qui tirent parti des eaux de leurs vallées, cultivateurs ou industriels, avec cette circonstance avantageuse que le produit des premières devient utilisable surtout aux époques où l'eau a le plus de valeur agricole, en été, tandis que le trop-plein liquide des lacs abonde sous l'action des pluies qui le rendent moins immédiatement nécessaire. L'action fécondante d'un glacier apparaît donc au moins égale sinon supérieure à celle d'un lac, et c'est sans doute ce qui explique, pour une bonne part, la fertilité bien connue de la plupart des grandes vallées alpestres. Quant aux industries hydrauliques modernes, on sait que leur plus bel essor se manifeste également dans ces vallées où la houille blanche des glaciers a fait naître une prospérité qui frappe tous ceux qui les visitent.

C'est donc à bon droit que le Ministère de l'Agriculture, conscient de l'importance croissante de la valeur des eaux, se préoccupe d'en améliorer sans cesse l'emploi et d'en mieux connaître les réserves. Le service d'étude des grandes forces hydrauliques répond à l'une de ces préoccupations et, parmi les objets qui sollicitent son attention, l'étude méthodique des réserves neigeuses et des glaciers figure au premier rang. C'est pourquoi son intérêt le plus sympathique est acquis à des travaux comme ceux de MM. Flusin, Jacob et Offner, Mougin, Bernard et autres savants qui, dans la voie ouverte par M. le professeur Kilian, ne reculent pas devant les difficultés et les fatigues inséparables des campagnes de recherches sur les glaciers. Dès 1902, les trois premiers avaient déjà donné une étude intéressante des glaciers qui jalonnent l'arête montagneuse située entre l'Oisans et le Valgaudemar et qui décroissent rapidement; l'année suivante, grâce aux subsides du Ministère de l'Agriculture, ils ont fourni une étude des plus sérieuses sur les glaciers de Vallouise, avec une carte au $\frac{1}{10.000}$ qui constitue, chez nous, une nouveauté en matière de topographie glaciaire détaillée. En 1905 et 1906, leur activité, solidement guidée par les admirables réseaux géodésiques de M. Helbronner, a trouvé un nouveau et magnifique terrain au massif des Grandes-Rousses et elle s'exerce, depuis deux ans, sur celui du Mont-de-Lans, dont la carte sera bientôt terminée. Dans l'intervalle, comme si nos Alpes ne pouvaient suffire à les occuper, MM. Flusin et Bernard, chargés d'une mission officielle, sont allés dans le Tirol autrichien étudier sur place les moyens d'exploration superficielle et profonde employés par les pro-

fesseurs Blümcke et Hess à l'Hintereisferner. D'autre part, MM. Mougin, Bernard et Douxami viennent d'aborder le massif du Mont-Blanc, où les beaux travaux de MM. Vallot avaient déjà préparé les voies pendant que d'autres exploraient les régions voisines, M. Girardin la Maurienne, M. Deschamps la haute vallée du Giffre, M. David-Martin les environs de Gap, etc.

On trouvera dans ce volume quelques-uns de leurs travaux, ils se recommandent d'eux-mêmes; tous ceux qui se préoccupent de l'aménagement des eaux dans les Alpes ne manqueront pas d'en apprécier le mérite et souhaiteront qu'ils se continuent.

*L'Ingénieur en chef du Service d'étude
des grandes forces hydrauliques,*

R. DE LA BROSSE.

FORAGES GLACIAIRES

à

GRANDE PROFONDEUR

(Appareil et Méthode de MM. BLUMCKE et HESS)

RAPPORT

de la mission scientifique envoyée en 1906 sur le Hintereisferner (Oetzal)

Texte du rapport par M. G. FLUSIN

Maitre de Conférences à la Faculté des Sciences de Grenoble

Dessins de l'appareil¹ par M. BERNARD

Inspecteur adjoint des Eaux et Forêts, à Annecy

Les glaciéristes ont, depuis longtemps, reconnu l'utilité d'établir des cartes à grande échelle des régions glacées qu'ils étudient. Ces levés ont non seulement pour but de mettre en évidence les variations de superficie, rapportées à un état défini, pris arbitrairement comme origine; ils servent, en outre, à coordonner les observations de vitesse et de direction des courants et à déterminer, par des procédés divers, les limites des bassins d'alimentation et d'ablation.

Mais, à mesure que les études glaciologiques s'orientaient plus nettement vers les conceptions et les méthodes expérimentales des sciences physiques, s'accroissait la nécessité de mesurer la troisième dimension, c'est-à-dire l'épaisseur de l'appareil glaciaire. L'obtention de trous de forage atteignant le lit du glacier peut, seule, conduire, par le tracé des profils transversaux, à la solution de problèmes d'une haute importance: parmi ceux-ci, il nous suffira de mentionner l'étude du surcreusement (Uebertiefung), des conditions d'existence des poches intraglacières analogues à celle de Tête-Rousse, des lois de variation de la température et de la vitesse en fonction de la profondeur et, enfin, la vérification expérimentale de la théorie de Finsterwalder.

¹ On ne reproduit ici qu'une partie de ces dessins, dont la collection complète pourra être communiquée aux personnes qui en feront la demande.

Au reste, l'intérêt théorique qui s'attache à la connaissance du sous-sol glaciaire se double d'un intérêt pratique considérable. A notre époque, où la Houille blanche est devenue une source de prospérité industrielle pour les pays montagneux, il importe d'être fixé sur les fluctuations possibles du régime de débit et sur les réserves de cette précieuse énergie qui sommeille au sein des glaciers; il est évident que le levé topographique du substratum rocheux, analogue au levé bathymétrique des lacs, peut, seul, fixer sur ce point.

Aussi a-t-on à enregistrer, au cours de ces dix dernières années, un certain nombre de tentatives de forages glaciaires à grande profondeur. Nous en esquisserons tout à l'heure un historique sommaire : elles n'ont servi, pour la plupart, qu'à montrer les difficultés auxquelles on se heurte dans ce genre de recherches et à préciser les moyens de les surmonter.

Cependant, dès 1895, deux savants allemands, M. Blümcke, professeur au Lycée Royal de Munich, et M. Hess, professeur au Lycée Royal d'Ansbach, étaient amenés, par la nature de leurs études, à effectuer sur le Hintereisferner, beau glacier de l'Oetztal, un sondage d'épreuve de 40 mètres. Ils poursuivaient depuis cette époque leurs essais, avec une sagacité et une persévérance admirables. Sans interrompre pour autant leurs observations glaciologiques parallèles, ils perfectionnaient progressivement leur technique et réussissaient, en 1904, à atteindre, à deux reprises, le lit du glacier par des fonds de 184 et 214 mètres.

Ces magnifiques résultats devaient attirer l'attention des glaciéristes français et plus spécialement celle du Service d'étude des forces hydrauliques, rattaché au Ministère de l'Agriculture. Aussi, sur les pressantes démarches de M. Charles Rabot et de M. de La Brosse, ingénieur en chef du Service d'étude des forces hydrauliques, à Grenoble, démarches que l'initiative éclairée de M. Dabat, directeur de l'Hydraulique agricole, fit rapidement aboutir, le Ministère décida qu'une mission serait envoyée en Tirol auprès de MM. Hess et Blümcke, pour étudier les procédés de forages glaciaires à grande profondeur mis en œuvre par ces savants. En nous désignant tous deux à cet effet, le Gouvernement nous donnait une marque de confiance que nous nous sommes efforcés de justifier; il nous est agréable d'offrir l'expression de notre sincère reconnaissance aux personnes que nous venons de nommer et qui ont bien voulu se souvenir, en la circonstance, du profit personnel que nous pouvions, en tant que glaciéristes, retirer de cette mission.

A cet égard, notre attente n'a pas été trompée. Pendant notre séjour sur le Hintereisferner, MM. Hess et Blümcke nous ont fait assister à deux forages, dont nous avons suivi les phases avec le plus vif intérêt et auxquels ils ont intentionnellement donné tous les caractères d'un enseignement. En leur disant ici notre gratitude pour leur obligeance et l'empressement avec lequel ils se sont mis à notre disposition, nous ne nous croyons pas quittes envers eux. Nous ne saurions, en effet, passer sous silence la courtoisie prévenante de leur réception et la cordialité de leur accueil : nous conservons des journées de travail et des soirées de causeries, vécues en commun, un souvenir ineffaçable.

La section de Nürnberg du D. u. O. Alpenverein a accordé à MM. Hess et Blümcke une subvention pour couvrir les frais des forages de 1906. C'est donc à cette Société

que nous sommes en partie redevables de la réalisation de nos projets et nous sommes heureux de lui en adresser nos vifs remerciements.

Aperçu historique. — L'exposé détaillé des tentatives de forages glaciaires à grande profondeur ne serait ici opportun que si la comparaison raisonnée des divers procédés mis en œuvre pouvait conduire à des conclusions d'ordre pratique et fournir des éléments nouveaux, propres à la solution du problème : tel n'est pas le cas.

L'intérêt de cet historique est donc tout rétrospectif et nous éprouvons d'autant moins de regrets à en tracer seulement une esquisse rapide, qu'un article fort intéressant de M. Mercanton¹ renferme, à cet égard, presque tous les détails propres à satisfaire la curiosité du lecteur qui voudrait bien s'y reporter. Nous désirons cependant, par une revue succincte des résultats obtenus antérieurement aux expériences de MM. Hess et Blümcke, montrer l'originalité de l'œuvre des savants allemands et mettre en lumière tout le mérite de leurs travaux.

Nous ne parlerons pas des forages glaciaires, limités à des profondeurs de quelques mètres; il existe à cet effet, depuis une quinzaine d'années, différents modèles d'instruments dont le fonctionnement ne laisse rien à désirer.

Les premiers essais de sondages profonds furent effectués sur l'Unteraargletscher; ils sont dus à Agassiz² et remontent à 1840-1842. Dignes d'éloges, ils n'ont cependant guère servi qu'à décourager les glaciéristes : les difficultés de l'entreprise leur parurent insurmontables, alors qu'une technique défectueuse leur en exagérait seulement l'importance. Au cours de ses trois campagnes, Agassiz employa uniquement le procédé par « percussion ». Après avoir, dans ses deux premières campagnes, perfectionné sa méthode, il réussit, en 1842, à forer, en six semaines, un trou de 8 centimètres de diamètre et de 60 mètres de profondeur : les frais et les ennuis furent tels qu'il abandonna ses recherches dans cette voie et que personne ne songea à les reprendre.

En 1897, M. Emile Vallot³ renouvelle sur la Mer de Glace, auprès du Montanvert, la tentative d'Agassiz. L'appareil est analogue; la méthode, un peu différente, est une combinaison du procédé par « percussion » et du procédé par « rotation ». Le mouvement rotatif du trépan est obtenu par torsion forcée de la corde à laquelle l'outil est suspendu. Comme Agassiz, M. Vallot opère dans un trou plein d'eau; il parvient à forer 25 mètres en neuf jours, au bout desquels le coincement du trépan dans le trou de sonde arrête les travaux.

En 1894, MM. Hess et Blümcke⁴ entreprenaient sur le Hintereisferner des re-

¹ Mercanton, *Archives des Sc. phys. et nat.*, Genève [4], XIX, 367 et 451, 1905.

² Desor, *Excursions et séjours dans les glaciers*, 1845, *passim*.

³ J. Vallot, *Annales de l'Observatoire du Mont-Blanc*, III, 190, 1898.

⁴ Blümcke et Hess, *Untersuchungen am Hintereisferner*, p. 33 (*Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des D. U. OE. Alpenvereins*, 1 Band, 2 Heft., München, 1899). — *Mitteilungen des D. U. OE. Alpenvereins*, 1896, p. 46; 1901, p. 280; 1902, p. 254; 1904, p. 33; 1905, p. 45.

cherches méthodiques dont on peut, au point de vue du mode opératoire, considérer les résultats comme définitifs. Dès l'abord, le procédé par percussion est abandonné et le procédé par rotation exclusivement adopté. L'outil est une tarière hélicoïdale, fixée à des tubes de fer et mue par une manivelle et un pignon d'angle; l'expulsion des débris de glace est assurée par injection, au fond du trou de sonde, d'un courant d'eau, qui circule dans les tubes de fer et s'échappe par un orifice pratiqué dans la tarière.

Le principe est, on le voit, entièrement nouveau. Si ingénieux qu'il fût, son application ne se montra pas exempte de tâtonnements et de déboires. Au reste, le relevé des profondeurs maxima qui furent atteintes par MM. Blümcke et Hess, au cours de leurs campagnes successives, témoigne suffisamment des progrès incessants de leur technique et de la puissance de leur dernier outillage.

Année 1895....	40 mètres.		
— 1899....	85	—	(2 sondages allant au fond du glacier).
— 1901....	142	—	
— 1902....	153	—	(1 sondage —).
— 1903....	118	—	(4 sondages —).
— 1904....	214	—	(2 sondages —).

La campagne de 1904 fut vraiment la consécration définitive de la méthode de forage instituée par MM. Hess et Blümcke; les profondeurs de 184 et 214 mètres auxquelles furent poussés les sondages, jusqu'au lit même du glacier, suscitèrent un véritable enthousiasme dans le monde des glaciéristes.

Il serait injuste de ne pas mentionner les essais effectués en 1900, sur le glacier du Trient, par MM. Dutoit et Mercanton¹. Les deux physiciens suisses, sans connaître la méthode ni les expériences de MM. Hess et Blümcke, imaginèrent un appareil analogue à celui des savants allemands. L'outil était une fraise creuse, à trois tranchants radiaux, fixée à des tubes de fer auxquels un tourne-à-gauche permettait d'imprimer un mouvement de rotation. Une pompe à simple effet, débitant 3 litres à la minute, refoulait dans les tubes un courant d'eau qui venait jaillir à la partie inférieure de la fraise. Les résultats d'une seule expérience furent très encourageants : 4 heures de travail suffirent pour atteindre une profondeur de 12 mètres.

Nous dirons enfin quelques mots des nombreuses tentatives de sondages profonds, qui ont été faites par l'un de nous, au glacier de Tête-Rousse : on sait, en effet, que la mise en observation et l'étude de ce glacier ont été confiées, sous la direction de M. Mouglin, à l'Administration des Eaux et Forêts.

Le mode opératoire adopté tout d'abord fut le procédé par percussion, à l'aide d'un biseau tranchant de 6 centimètres de largeur, fixé à des tubes de fer. En 1900, 226 mètres de sondages, répartis sur 25 trous, furent exécutés, la profondeur maximum atteinte ne dépassant pas 18 mètres; le glacier était, ici, constitué par du névé en voie de transformation.

En 1901, le même procédé fut appliqué à une région du glacier où n'existait que

¹ Constant Dutoit et Mercanton, *C. R.* de la 84^e session de la Soc. Helv. des Sc. nat., Zofingen, 1901.

de la glace, très pauvre en bulles. Il ne donna que des résultats fort médiocres : le sondage le plus profond exigea 10 heures de travail pour descendre à 11,5 mètres.

En 1902, les tubes de fer furent remplacés par des barres octogonales et le biseau par une tête de sonde munie de deux tranchants à angle droit; un échafaudage, sur lequel prenaient place 3 ouvriers, permettait de porter à 6 le nombre des hommes actionnant l'outil. On put, dans ces conditions, forer un trou de 16,4 mètres en 20 heures, mais il fut impossible d'aller plus bas.

C'est alors seulement que M. Bernard eut connaissance des travaux de MM. Hess et Blümcke. Sur les indications fournies par M. Hess, une maison de Grenoble établit un appareil analogue au premier modèle du Hintereisferner et qui fut expérimenté, en 1903, au glacier de Tête-Rousse; la forme défectueuse donnée à la tête de sonde, ainsi que d'autres vices de construction, empêchèrent les expériences d'être concluantes.

L'appareil fut modifié pendant l'hiver et la campagne de 1904 comprit l'exécution d'un forage de 32,5 mètres en 28 heures. La rencontre de plusieurs pierres vint apporter quelque entrave à la marche régulière du forage et M. Bernard dut, à plusieurs reprises, se servir de la tête de sonde comme d'un trépan à percussion pour briser ou déplacer l'obstacle.

Il ressort nettement de ce court aperçu que l'outillage de MM. Hess et Blümcke, mis au point par dix années d'expérimentation soutenue, est le seul qui permette, pratiquement, de mesurer des épaisseurs de glace atteignant plusieurs centaines de mètres.

I. — DESCRIPTION DE L'APPAREIL.

Ainsi que nous l'avons vu déjà, l'appareil employé par MM. Hess et Blümcke repose sur les principes suivants : perforation de la glace par rotation d'une tarière de forme appropriée; expulsion continue des débris de glace par un courant d'eau sous pression, circulant dans les tubes de sonde et débouchant au front d'attaque.

Cet appareil a été construit par Heinrich Mayer et C^o, Tiefbau-Werkzeuge-Fabrik, à Nürnberg-Doos. Sans tubes de sonde, il pèse environ 2.500 kilos et a coûté 2.200 marks, pris en fabrique. Le mètre courant de tubes revient, dans les mêmes conditions, à 2,40 marks et pèse 3,5 kilos. Les seuls frais de douane et de transport de Nürnberg au Hochjochhospiz se sont élevés à 100 marks pour 70 mètres de tubes.

Pendant notre séjour sur le Hintereisferner, nous avons eu entière liberté de prendre des croquis cotés de l'appareil, dont les organes les plus complexes ont même été démontés pour que nous puissions nous rendre compte de leur constitution. D'un commun accord, l'un de nous s'est spécialement chargé de dresser les plans de l'appareil, l'autre ayant pour tâche de suivre les opérations de forage et de rédiger le présent rapport.

A l'aide des seuls dessins ci-annexés, il est possible de faire construire un appareil identique à celui de MM. Hess et Blümcke : un commentaire de ces dessins semble donc superflu. Nous croyons utile, néanmoins, de donner une description

sommaire qui permettra une lecture plus aisée des croquis et dissipera toute équivoque sur la terminologie, très spéciale, à laquelle nous nous sommes arrêtés.

Nous étudierons donc successivement le bâti, le treuil de retenue et le système de suspension mobile, le moteur rotatif à bras, la tarière rubanée à injection d'eau, les tubes de sonde, la pompe d'alimentation, les accessoires et les outils.

Bâti. — Le bâti (fig. 1 à 10), en bois de charpente, se compose d'un cadre trapézoïdal (fig. 1) qui doit reposer sur la glace dans une position horizontale. Aux angles de ce cadre se trouvent ménagées des mortaises cylindriques (fig. 4), dans lesquelles prennent appui les quatre montants obliques d'une chèvre. Ces montants sont munis, à leur partie supérieure, d'une fourche dans laquelle passe un axe goupillé qui supporte, en outre, l'étrier de la poulie de suspension (fig. 10).

Chacune des parties constituantes de cette charpente est formée de deux morceaux qui sont assemblés par des boulons, des plaques d'appui et des étriers de force (fig. 2 et 3). Cette disposition a pour effet de faciliter le transport, en diminuant la longueur et le poids des pièces de bois.

Treuil de retenue et système de suspension mobile. — Sur la poulie, fixée à la chèvre, passe un solide câble d'acier qui s'enroule sur le tambour du treuil de retenue et dont l'extrémité libre porte le système de suspension mobile (vue d'ensemble, fig. 10).

Le treuil (fig. 11), qui commande la descente ou la montée de la sonde, est formé d'un axe à manivelle AB, muni d'un rochet *r* et d'un frein à friction de Prony F; le pignon de cet axe engrène sur la roue dentée du tambour de treuil (phot. 1, pl. I).

Le système de suspension mobile (fig. 23 et 24) comprend deux parties réunies par un manchon fileté *m*: la suspension tournante à billes S, sur laquelle peut porter tout le poids de l'appareil perforateur, et le bec-raccord R, par où pénètre dans les tubes de sonde l'eau envoyée par la pompe.

La suspension tournante S est formée de deux plateaux d'acier *a*, *b*, dont les faces internes sont creusées de rainures concentriques occupées par des billes. Le plateau supérieur *a* est vissé sur l'arbre *c*, qui traverse, à frottement doux, le plateau inférieur *b* et dont le mouvement ascensionnel est limité par un épaulement *d*; un écrou *e* et un contre-écrou *e'* assurent la fixité du réglage. Grâce à un manchon vertical *f*, formant boîte étanche, les billes baignent dans l'huile dont les projections sont arrêtées par un couvercle *g*.

Le bec-raccord R se compose d'une chambre à eau *h*, reposant, par une double rangée de billes, sur un épaulement *i* du tube *k*; l'étanchéité est assurée par deux boîtes à étoupes, le réglage s'obtenant par le presse-étoupes supérieur *n* qui est fileté sur le tube *k*. La chambre à eau est munie d'une tubulure *t* à laquelle s'adapte, par le moyen d'un raccord-cône à collier, le tuyau de refoulement de la pompe. De la sorte, malgré le mouvement de rotation du tube *k*, la chambre à eau conserve une position fixe et l'eau pénètre à l'intérieur du tube par des ouvertures circulaires *o* ménagées dans sa paroi.

Enfin l'extrémité inférieure de ce tube est filetée et porte un contre-écrou *p*; c'est sur elle que viennent successivement se visser les tubes de sonde *r*, soit dans les opérations de forage, soit dans celles de relevage.

Moteur rotatif à bras. — Le moteur rotatif à bras (vue d'ensemble, fig. 10) est destiné à imprimer au système perforateur son mouvement de rotation. Il comprend deux parties (phot. 2 et 3, pl. I): l'arbre à manivelles et le plateau à engrenages d'angle (fig. 16 à 20).

L'arbre à manivelles, fixé par des paliers à deux montants de la chèvre, porte une poulie sur laquelle passe la courroie de transmission.

Le plateau à engrenages d'angle (fig. 16 à 20) se compose d'un arbre horizontal *a*, porté par deux paliers *b*, *c*, sur lequel est fixée une poulie *d* recevant la courroie de transmission. Cet arbre se termine par un engrenage d'angle *e* et peut recevoir, à son autre extrémité, une manivelle démontable *f*. L'engrenage *e* transmet son mouvement à une couronne dentée *h*, solidaire d'un manchon *i* et reposant sur un plateau à cuvette *k*. Le manchon *i* porte, d'autre part, une rainure longitudinale (fig. 20), dans laquelle peut se déplacer verticalement la glissière *g*. L'extrémité supérieure de celle-ci est munie d'un épaulement traversé par trois vis de pression (fig. 17 et 18), par lesquelles les tubes de sonde *r* sont rendus solidaires de la glissière.

La vitesse de rotation de la couronne *h* est de 72 tours pour 49 tours de l'arbre à manivelles.

On comprend que, par ce dispositif, l'enfoncement progressif des tubes de sonde dans le glacier peut librement se produire pour toute la hauteur de la glissière, sans que le mouvement de rotation soit gêné.

Le sommier de bois, sur lequel est solidement fixé le plateau à engrenages, repose sur le cadre trapézoïdal par l'intermédiaire de deux étages de poutres croisées.

Tarière rubanée à injection d'eau. — Le soin, avec lequel la forme de l'outil perforateur, l'inclinaison et le profil des dents ont été étudiés dans leurs moindres détails, a contribué pour une grande part à la réussite des essais du Hintereisferner.

Les figures 25 et 26 représentent, en grandeur naturelle, la tarière hélicoïdale en acier trempé (phot. 5, pl. II), qui se visse sur les tubes de sonde par le moyen d'une douille filetée A. Cette douille communique avec une échancrure B qui traverse de part en part le sommet de la tarière, de sorte que le courant d'eau, amené par les tubes de sonde, vient frapper contre le bord de l'échancrure et se partage en deux jets obliques symétriques.

Le tranchant inférieur de la tarière est constitué par la denture de fraisage D dont les figures donnent la forme approximative. La difficulté de représentation graphique de ces dents nous engage à conseiller l'achat de la tarière auprès du constructeur de Nürnberg. Nous appellerons l'attention sur la denture de relevage R, grâce à laquelle l'outil a une action efficace contre les cas de déformation ou d'obstruction du trou de forage.

Tubes de sonde. — Les tubes de sonde, en fer, ont une longueur de 2 mètres, un diamètre extérieur de 33 millimètres et un diamètre intérieur de 23 millimètres. Une extrémité est fileté sur une longueur de 40 millimètres. L'autre extrémité se termine par un manchon à bout arrondi (fig. 16 : *m*; fig. 25 : *r*) de 80 millimètres de longueur et 47 millimètres de diamètre extérieur; ce manchon est fileté intérieurement sur une profondeur de 40 millimètres, jusqu'à l'épaule du tube. Cet épaulement forme butée lorsqu'on visse dans le manchon le bout mâle d'un autre tube.

La longueur utile des tubes de sonde ne comprend pas la partie fileté du manchon, de sorte que la longueur totale d'un tube doit être 2,04 mètres.

Lorsque les tubes, pour une raison quelconque, n'ont pas cette dimension normale, il convient de graver sur chaque tube sa longueur exacte.

Pompe d'alimentation. — La pompe d'alimentation (phot. 4, pl. II) est une pompe aspirante et foulante d'un modèle courant. Elle ne présente aucune particularité sur laquelle nous ayons à insister : tout au plus, signalerons-nous que les soupapes sont facilement accessibles par le simple desserrage de tenons à écrous et l'enlèvement d'un couvercle.

Le volume du coup de piston est de 1.720 centimètres cubes environ.

Le tuyau d'aspiration, en caoutchouc entoilé, de 3 à 4 mètres de longueur, est muni à son extrémité libre d'une boîte métallique perforée (crépine), qui plonge dans la cavité d'alimentation creusée dans le glacier.

Le tuyau de refoulement, en caoutchouc fortement entoilé, de 3 mètres de longueur, peut résister à une pression de 15 à 20 atmosphères.

La pompe est placée sur un échafaudage de poutres, de façon que les bras de manœuvre soient à une hauteur convenable.

Accessoires et outils. — La suite régulière des opérations de forage et les éventualités auxquelles on peut avoir à faire face nécessitent un certain nombre d'accessoires et d'outils. Nous nous contenterons de les énumérer ici, sans parler de leur mode d'emploi, sur lequel nous aurons, pour certains, à revenir plus loin et qui, pour les autres, se comprend de lui-même.

ACCESSOIRES

- Une clef de retenue. (Phot. 6, pl. II, c.)
- Une traverse de retenue. (— 6, — , a.)
- Un crochet de relevé.
- Deux agrafes de relevé. (— 6, — , b.)
- Une tarière rubanée de rechange. (Phot. 5, pl. II.)
- Une broche raccrocheuse.
- Un cône raccrocheur.
- Deux douzaines de pieds de biche, pour réunir les poutres de bois.
- Un traîneau.

OUTILS

- Deux pinces pour manchons.
- Deux pinces pour tubes.
- Une clef à tubes, dite « française ».
- Une clef à carré pour vis de pression de la glissière.
- Un jeu de clefs pour les écrous de l'appareil.
- Une clef à pointes pour les boîtes à étoupes.
- Une lime triangulaire.
- Un ciseau à goupilles.
- Un burin.
- Un marteau.
- Une paire de tenailles.
- Une hachette.
- Une pelle.
- Un tourne-vis.
- Un petit étau à griffes.
- Clous, vis, cordes.

II. — TECHNIQUE DU FORAGE.

Au cours des forages exécutés en notre présence, nous avons été à même d'étudier, dans ses moindres détails, le mode opératoire auquel s'est arrêté M. Hess. La tâche nous a d'ailleurs été facile : en outre de l'enseignement visuel qui nous était généreusement donné, les explications verbales ne nous ont pas fait défaut. M. Hess a su, presque toujours, prévenir nos questions et il est même allé, dans son inépuisable complaisance, jusqu'à nous confier, à tour de rôle, son poste de manœuvre au treuil de retenue.

En s'employant ainsi à nous transmettre leur expérience consommée des forages glaciaires, MM. Hess et Blümcke ont montré qu'ils entendaient faire bénéficier la science, sans réserves, des résultats de longues années de recherches et d'efforts. Aussi croyons-nous devoir décrire minutieusement la technique dont ils sont les auteurs, non moins pour remplir la mission qui nous a été confiée que pour répondre au désir de vulgarisation formulé par les savants allemands. Ce faisant, nous avons pour but d'éviter aux glaciéristes toute incertitude et tout tâtonnement dans les recherches méthodiques qu'ils pourraient entreprendre dans la même direction.

Transport de l'appareil sur le glacier. — Ainsi que nous l'avons vu, l'appareil de MM. Hess et Blümcke est construit de façon à pouvoir se démonter en pièces, n'excédant pas la charge d'un porteur. En effet, le transport à dos d'homme est le plus souvent nécessaire, soit pour atteindre les parties peu inclinées du glacier, soit pour en contourner les parties tourmentées.

Dès que le relief glaciaire le permet, il est avantageux d'avoir recours au traîneau (phot. 7, pl. III) : trois ou quatre hommes halent sur des cordes attachées à l'avant, tandis qu'un autre assure la direction au moyen d'un levier fixé à l'arrière et servant, au besoin, de frein. Ce mode de transport réalise une notable économie de temps et de fatigue : son emploi sera malheureusement limité, dans nos Alpes, à quelques glaciers peu nombreux.

Choix de l'emplacement. — Il convient, avant tout, d'étudier avec soin l'emplacement, sur lequel on montera l'appareil et où l'on effectuera le sondage; on se laissera guider, dans son choix, par des considérations de divers ordres.

Tout d'abord, la position exacte du trou de forage devant ultérieurement être reportée sur le plan du glacier, il est nécessaire que, de la station choisie, on puisse se relever, soit au tachéomètre, soit à la planchette, sur un nombre suffisant de pyramides, convenablement disposées, des réseaux géodésique et topographique. Nous ferons d'ailleurs remarquer que la coordination des résultats des sondages suppose l'existence d'une carte à grande échelle : il importe, en effet, après avoir corrigé de l'ablation les valeurs obtenues, de pouvoir rapporter à un même état initial les différentes profondeurs relevées dans une série de campagnes.

Il est utile, au surplus, de connaître approximativement la profondeur minimum au point considéré, pour ne pas s'attaquer à une épaisseur de glace supérieure à la longueur totale des tubes de sonde dont on dispose. Deux procédés indirects peuvent fixer à cet égard : le levé préalable du glacier et du terrain encaissant permet de tracer le profil transversal du lit, en admettant que les rives rocheuses ne subissent pas de rupture de pente au-dessous de la surface glaciaire; on peut aussi calculer grossièrement la profondeur, connaissant la vitesse superficielle, la valeur de l'ablation et la distance au front du glacier.

Il faut, d'autre part, observer certaines conditions destinées à augmenter les chances matérielles de réussite. C'est ainsi que, pour écarter, autant que possible, toute éventualité de rencontre de la tarière avec les blocs d'une moraine interne, on évitera de se placer sur une ligne de courant, issue d'un promontoire rocheux. De même, on étudiera attentivement le pandage des petites crevasses, afin de se tenir en dehors de leur trajet probable : on risquerait autrement de compromettre irrémédiablement le succès du forage. Enfin, il est indispensable de voir si le régime des eaux de fusion superficielle suffit à l'alimentation de la pompe.

Montage de l'appareil. — La place du trou de forage une fois adoptée, on procède au montage de l'appareil :

1° On creuse, au piolet et à la pelle, un emplacement pour le cadre trapézoïdal qu'on établit solidement, en le calant, au besoin, avec des pierres et en vérifiant son horizontalité. Les quatre montants de la chèvre sont ensuite étendus sur le sol, dans les positions respectives qu'ils doivent occuper et la goupille de connexion est placée dans les orifices des fourches, après intercalation préalable de l'étrier de suspension (fig. 4 et 10). Un homme se plaçant alors à chaque montant, on soulève progressivement la chèvre, on accroche la poulie de manœuvre à son étrier et on amène les embouts des montants dans les trous correspondants du cadre trapézoïdal : c'est là un travail assez pénible, car le poids de la chèvre, ferrures comprises, est d'environ 340 kilos.

On aplanit la glace, à l'intérieur et aux alentours du bâti horizontal, en tassant les débris contre les pierres qu'on a pu employer; les bois du bâti doivent dépasser la surface du glacier;

2° Sur les deux côtés obliques du cadre trapézoïdal, on dispose deux madriers transversaux qui supportent à leur tour deux madriers perpendiculaires, dont l'un est légèrement échanuré (fig. 16) pour le passage du tambour du plateau denté. Cet échafaudage reçoit le sommier de bois massif portant l'arbre et les couronnes

dentées du système moteur rotatif; on fait en sorte que le centre de rotation soit à peu près dans la verticale de la poulie de manœuvre;

3° Les arbres du treuil et de l'arbre moteur à manivelles sont successivement fixés sur leurs paliers;

4° On passe le câble métallique dans la gorge de la poulie, qui doit être parallèle à la grande roue du treuil, et on fixe, à son extrémité, la suspension tournante à billes et le bec-raccord à eau. Enfin, avant d'enrouler le câble sur le tambour du treuil, on a soin de l'étendre pour prévenir les effets de torsion;

5° On déplace le sommier de façon à amener l'orifice central du plateau denté sur la verticale du système suspenseur. On met la glissière, on place la courroie et on termine le réglage en faisant tourner l'axe moteur à manivelles;

6° On monte la pompe sur son échafaudage et on enfonce les pieds de biche qui fixeront solidement les uns aux autres tous les madriers;

7° On creuse le bassin et les rigoles d'alimentation, ainsi que le canal par lequel l'eau s'écoulera du trou de sonde. Il est naturellement préférable de creuser le bassin avant les rigoles;

8° On garnit les boîtes à huile et les trous de graissage et on dispose, à hauteur convenable, des pierres plates et des planches sur lesquelles montent les ouvriers.

Il faut environ 4 à 5 heures à l'équipe de M. Hess, composée de quatre hommes, pour monter l'appareil (phot. 24, pl. IX), les pièces se trouvant à proximité du lieu de sondage.

Forage. — On visse tout d'abord le perforateur, c'est-à-dire la tarière que nous avons décrite, sur un tube préalablement introduit dans la glissière, car le diamètre intérieur de celle-ci ne permettrait pas le passage de l'outil. On visse ensuite le manchon fileté du tube au bec-raccord, en serrant fortement le contre-écrou; on amène la glissière au haut de sa course et on la rend solidaire du tube en centrant aussi exactement que possible ce dernier (phot. 10, pl. IV). Enfin, on vérifie le fonctionnement de la pompe; l'eau doit jaillir avec force de la tarière, en formant deux jets divergents qui viennent frapper la glace.

Ces dispositions préliminaires une fois prises, tout est prêt pour le forage et les ouvriers se mettent aux places respectives qu'ils doivent occuper (phot. 8, pl. III).

Le chef d'équipe manœuvre le treuil qui commande le câble métallique. Deux hommes actionnent la pompe qui, dès cet instant, ne doit plus s'arrêter que pendant l'ajustage d'un nouveau tube ou, en cas d'accident, au commandement exprès du chef d'équipe. Deux hommes tournent les manivelles de l'axe moteur : pourtant, jusqu'à ce qu'on ait atteint une profondeur de 10 à 12 mètres, l'un d'eux grimpe au sommet de la chèvre et repose les pieds sur la suspension à billes afin d'augmenter, par son poids, la vitesse de pénétration (phot. 9, pl. IV). Un seul homme suffit, en effet, au début, à faire mouvoir le système rotatif, ou même à actionner la pompe.

La tarière s'enfonce progressivement dans le glacier (phot. 13, pl. VI); l'eau, refoulée par la pompe, remonte par l'espace annulaire compris entre le tube et les

parois du trou de forage et s'écoule par le canal de déversement, entraînant avec elle les débris de glace. Le tube descend peu à peu et la glissière, qui en est solidaire, arrive par conséquent au bas de sa course. Le mouvement de rotation est alors suspendu (phot. 11, pl. V) pour permettre de remonter la glissière, puis le forage reprend (phot. 15, pl. VI). Le système se trouve de nouveau arrêté bientôt dans sa descente : on remonte encore la glissière qui vient, cette fois, buter contre le manchon du tube, de sorte qu'à la troisième phase du forage, le tube arrive lui-même à bout de course (phot. 12, pl. V).

A ce moment, le chef d'équipe, agissant sur le treuil, retire la sonde de 40 centimètres environ; après quoi, les ouvriers cessent de faire tourner la tarière. On continue de pomper pendant 3 à 4 minutes, en favorisant l'entraînement des débris de glace à l'aide d'un morceau de bois qu'on agite dans le trou de forage. On redescend le tube à fond et on cesse de pomper.

On dévisse alors le contre-écrou, puis la douille filetée du bec-raccord; on élève à mi-hauteur le système suspenseur et on fixe à la douille du bec-raccord un nouveau tube, dans lequel on a fait passer un courant d'eau pour le bien nettoyer; puis on amène, à l'aide du treuil, l'extrémité inférieure du nouveau tube sur le manchon de l'ancien et on le visse à bloc, en donnant avec le treuil le jeu nécessaire (phot. 14, pl. VI). On monte la glissière sur le nouveau tube, on commence à pomper et le forage reprend comme ci-dessus.

Détails sur le forage. — En comptant le chef d'équipe qui est au treuil, on voit que cinq hommes sont nécessaires au travail de sondage; ce nombre est suffisant, tant qu'on ne dépasse pas 80 mètres. Au delà de cette profondeur, on est obligé d'employer des hommes de renfort, car la manœuvre de la pompe devient excessivement pénible.

Il importe que le forage soit mené aussi rapidement que possible. Sans parler de la raison pécuniaire, le mauvais temps peut venir interrompre les travaux et l'effet de l'avancement normal du glacier aussi bien que la formation des crevasses internes sont à craindre. Pour éviter toute perte de temps, il convient donc d'avoir une équipe fortement disciplinée : les mouvements de chaque ouvrier doivent devenir en quelque sorte automatiques, afin qu'à aucun moment il n'y ait, de la part de l'un d'eux, une hésitation entraînant un flottement et, par suite, un retard dans l'acte de la collectivité. A ce point de vue, les ouvriers de M. Hess ont acquis une remarquable précision de mouvements.

Il serait long et inutile de donner à ce sujet des détails plus circonstanciés. Quelques journées d'apprentissage, sous une direction intelligente, permettront aux ouvriers d'acquiescer, par l'accoutumance, la sûreté de manœuvre indispensable. Nous nous contenterons d'indiquer, par deux exemples, dans quel sens doit être cherchée cette coordination minutieuse des gestes des travailleurs.

Dès que la glissière arrive à fond de course, le chef d'équipe et l'homme de manivelle, qui lui est diagonalement opposé, se rendent auprès du plateau denté : le premier, agissant d'un tour de clef sur une des trois vis de serrage, libère la glissière que le second amène à sa position de départ, où elle est aussitôt maintenue par le blocage de la vis; dans ces conditions, 15 secondes seulement s'écoulent entre l'arrêt et la reprise du forage.

De même, lorsqu'un tube doit être ajouté, le dévissage du bec-raccord exige le concours de deux ouvriers et le montage du nouveau tube, celui de trois ouvriers : on se rendra aisément compte par les photographies 16 et 17 (pl. VII) de la part que chacun des hommes prend à ce travail.

Enfin, le fonctionnement de la pompe exigeant une dépense musculaire plus considérable que celui de l'axe moteur rotatif, les équipes permutent toutes les heures; pour le même motif, les deux hommes de manivelle vont renforcer l'équipe de pompe lorsque, un tube étant à sa fin, on remonte la tarière de 40 centimètres et qu'on pompe, sans tourner, pendant quelques minutes.

Le chef d'équipe occupe, au treuil de suspension, le poste le plus délicat : alors que les ouvriers n'ont qu'à s'efforcer de conserver un régime uniforme à la rotation de l'outil et au refoulement de l'eau, celui-là doit, au prix d'une attention soutenue, compenser immédiatement toute variation dans la résistance offerte à la perforation. C'est là le rôle que se réserve d'ordinaire M. Hess et voici, d'après lui, quels sont les principes qui peuvent guider l'opérateur dans la manœuvre du treuil.

Le déroulement du câble doit toujours s'effectuer progressivement, non par à-coups, mais d'une façon continue; en d'autres termes, le treuil doit, à chaque instant, avoir sur la vitesse de perforation une action retardatrice, plus ou moins grande, mais jamais nulle.

L'effort de retenue est variable : jusqu'à 25 ou 30 mètres, on laisse agir presque tout le poids des tiges de sonde. À partir de cette profondeur, il faut exercer un effort croissant pour s'opposer à l'enfoncement exagéré de la tarière; aussi, à des profondeurs supérieures à 120 mètres, emploie-t-on, pour régler la descente, un frein auxiliaire qui absorbe la plus grande partie du poids des tubes.

Si on laisse le câble métallique se dérouler trop vite, on est généralement averti par le mouvement circulaire que peut prendre la boîte de suspension à billes : il faut alors augmenter immédiatement la tension du câble.

Toutes les fois que, pour une raison quelconque, le forage a été interrompu, il est de règle absolue de tendre fortement le câble avant de reprendre le travail, de façon à soulever les tubes et à dégager les dents de l'outil.

La durée d'un forage est, le plus souvent, supérieure à une journée. Par suite, on est, en général, contraint, le soir venu, d'arrêter le travail, car on ne saurait trouver, pendant la nuit, l'eau de fusion nécessaire à l'alimentation de la pompe. Il va de soi que le mauvais temps peut entraîner la même obligation.

Dans l'un et l'autre cas, il est indispensable, avant d'abandonner l'appareil, de prendre les précautions suivantes. La tarière étant remontée de 1 mètre environ, on fait pomper pendant 10 à 15 minutes, jusqu'à ce que l'eau sortant du trou de forage ne tienne plus en suspension de débris de glace. Lorsque ce résultat est atteint, on libère la glissière qui vient reposer sur le plateau denté et on enroule encore le câble : dès que le manchon du deuxième tube dépasse un peu la glissière, on passe entre eux la clef de retenue (c, phot. 6, pl. I), de sorte que, le câble étant détendu, le système de forage se trouve suspendu par le manchon sur la clef de retenue. Il ne reste plus qu'à dévisser le premier tube, à démonter le tuyau de refoulement de la pompe et à vider complètement celle-ci.

En reprenant le travail le lendemain, il ne faut pas négliger de pomper avant de baisser la sonde.

Relevage des tubes de sonde et mesure de la profondeur. — Nous verrons plus loin à quels signes on reconnaît que la tarière repose sur le fond du glacier; nous supposerons pour l'instant que ce résultat a été atteint, c'est-à-dire que le forage est terminé.

Avant tout, on mesure exactement la hauteur du dernier tube à l'affleurement de la glace. Si l'on a pris soin de noter le nombre de tubes, de longueur connue, qui ont été successivement ajoutés bout à bout, on sait déjà à quelle profondeur est parvenu l'outil. Le nombre ainsi obtenu doit être vérifié au cours du démontage des tiges de sonde.

Le premier tube, qui n'a pénétré dans le glacier que d'une fraction déterminée de sa longueur, est mis à part. Tous les autres tubes sont placés côte à côte, au fur et à mesure de leur sortie, et appuyés contre un madrier où il n'y a qu'à les compter. Si quelques tubes ont une longueur anormale, ils sont placés séparément. La longueur ainsi calculée est augmentée de la fraction utile du premier tube et de la hauteur de la tarière.

Pour procéder au relevage des tubes, on met l'outil en rotation et on le relève, au treuil, de 1 mètre environ. (On rencontre parfois, ainsi que nous avons eu l'occasion de le constater, des difficultés assez sérieuses dans cette première opération.) Ceci fait, les hommes de manivelle cessent leur travail et l'équipe de pompe continue à injecter de l'eau, jusqu'à ce qu'il ne remonte plus de débris de glace. Les hommes de pompe s'arrêtent à leur tour : on démonte le tuyau de refoulement, on libère la glissière, qu'on fixe à sa position supérieure habituelle, et on enroule le câble du treuil. La glissière sort alors de son logement et le manchon du deuxième tube apparaît au-dessus du plateau denté. On introduit dans la fourchette de l'agrafe de relevage la portion saillante du tube : il suffit de mollir le câble pour que, le manchon du deuxième tube venant reposer sur la fourchette, tout le poids des tiges de sonde soit supporté par le plateau denté.

On enlève le premier tube et, avec lui, la glissière qui y est restée fixée, et on remplace la boîte de suspension à billes par un crochet dans lequel on vient engager l'étrier de l'agrafe de relevage (phot. 20, pl. VIII).

Les ouvriers prennent alors les positions suivantes (phot. 21, pl. VIII) : un homme au treuil, un autre debout sur le sommier avec une clef à griffes, les deux derniers en face de lui, avec une pince à tubes. On remonte, au moyen du treuil, les tubes jusqu'à ce que le manchon du troisième tube émerge du plateau denté. Une seconde agrafe est aussitôt placée (phot. 19, pl. VII), le manchon saisi avec une pince et le tube supérieur dévissé par les deux derniers ouvriers. Le treuil, tournant en sens inverse, amène à portée des hommes le tube et la première agrafe qui est enlevée du crochet où est immédiatement introduit l'étrier de la seconde agrafe.

Cette manœuvre de va-et-vient se poursuit jusqu'à ce qu'il ne reste plus que

15 à 20 mètres de tube; l'emploi du treuil devient alors inutile et on relève les tubes à force de bras, en plaçant néanmoins une agrafe sous chaque manchon.

Quand on a sorti le dernier tube, on recouvre le trou de sondage avec une planche sur laquelle on laisse reposer l'outil; on passe une barre de fer dans l'orifice à eau de la tarière et on essaie de dévisser. Les efforts de forage ont parfois bloqué les filetages avec une force telle qu'on est obligé d'enlever le plateau denté pour dévisser plus commodément la tarière.

Démontage et hivernage de l'appareil. — Les opérations de démontage de l'appareil ne présentent guère de particularités qui méritent une mention spéciale. Seul, le démontage de la chèvre est quelque peu délicat, mais le mode opératoire ne diffère en rien du procédé classique, connu de tous les artisans, et nous ne croyons pas devoir nous y arrêter.

Comme nous l'avons dit précédemment, le déplacement des pièces de l'appareil peut, sur le Hintereisferner, s'effectuer entièrement par traîneaux (phot. 22, pl. IX). Ces pièces sont amenées à la nouvelle station de forage ou bien, lorsque la campagne est terminée, à la place choisie pour l'hivernage. Les frais de transport sont, en effet, trop considérables pour qu'on puisse songer à redescendre la lourde machine dans un chalet habité. C'est sur une des moraines latérales du glacier que, depuis 1901, MM. Hess et Blümcke abandonnent chaque année leur appareil; pour que celui-ci ne subisse aucune détérioration, quelques précautions sont pourtant nécessaires.

La station d'hivernage (phot. 23, pl. IX) doit être choisie sur le rocher ou sur une moraine latérale stable, à l'abri des avalanches, aussi bien que des eaux de grande fonte. Toutes les parties métalliques, filetées, dressées ou polies, sont soigneusement graissées; les corps de pompe, en particulier, sont bourrés de linges gras. Les pièces les plus délicates sont emportées au lieu habité le plus voisin : ce sont le câble métallique, la glissière, la suspension tournante à billes, le bec-raccord à eau, les tuyaux de toile caoutchoutée, la courroie, les pistons de la pompe, les tarières, la pelle, l'arrosoir et les outils.

Il convient, à ce propos, de signaler le respect que touristes et guides autrichiens montrent pour le matériel scientifique dont est parsemé le Hintereisferner : pyramides en pierres sèches, signaux à fanions, lignes de pierres peintes, jalons, piquets d'ablation, tarières à main, tubes de sonde, sans parler de l'appareil à forages lui-même, sont tacitement placés sous la sauvegarde de tous et jamais MM. Hess et Blümcke n'ont eu à regretter leur confiance.

III. — PARTICULARITÉS DU FORAGE.

Nous connaissons maintenant le maniement de l'appareil et son fonctionnement, dans des conditions supposées normales. Ce serait là un exposé incomplet de la question, si nous ne cherchions pas à préciser les caractères auxquels on reconnaît que l'entreprise a réussi, c'est-à-dire que le fond du glacier est atteint, et si

nous gardions le silence sur les obstacles principaux auxquels on peut avoir à faire face.

Caractères avertisseurs de la fin du forage. — Les signes permettant de conclure que l'outil est parvenu jusqu'au lit du glacier sont, pratiquement, les suivants :

Tant que le forage s'effectue dans la glace, on est obligé d'exercer au treuil un effort assez considérable pour retenir l'outil qui, sous le poids des tiges de sonde, tend à s'enfoncer trop rapidement. Dès qu'on atteint le sol rocheux, la tendance à la pénétration devient presque nulle et, par suite, la sensation de l'effort musculaire déployé au treuil disparaît brusquement. D'autre part, le câble métallique, n'ayant plus à supporter le poids des tubes de sonde, perd au même instant sa rigidité. Enfin, le son, habituellement clair, des engrenages d'angle se transforme en un bruit sourd, presque rauque, très caractéristique.

Les apparences seraient sensiblement les mêmes si l'outil venait à rencontrer de gros blocs noyés dans la masse du glacier. A vrai dire, cette éventualité ne se réalise que très rarement si l'on prend, ainsi que nous l'avons dit, la précaution de se placer en dehors du trajet des moraines internes. M. Hess croit maintenant plus vraisemblable de voir, dans l'empâtement des dents de la tarière ou dans l'engorgement du trou de forage par les débris de glace, les causes de la plupart des arrêts qu'il attribuait autrefois à la rencontre de blocs rocheux.

Le fait peut pourtant se présenter : l'un de nous, dans ses essais de sondages au glacier de Tête-Rousse, l'a même observé avec une regrettable fréquence. Il peut ne s'agir que de simples cailloux qui, sous le poids de l'appareil, s'écartent d'eux-mêmes et se moulent dans les parois du trou de forage. Leur masse peut, d'ailleurs, se trouver suffisante pour apporter un ralentissement notable dans la vitesse de pénétration et tel semble avoir été le cas, au cours du second forage auquel nous avons assisté : M. Hess estime qu'il faut alors une heure de travail pour percer une pierre d'une épaisseur d'environ 20 centimètres. On conçoit, enfin, que la masse du bloc puisse être assez grande pour opposer à l'avancement de la tarière une résistance de même grandeur que le lit rocheux lui-même; il semble donc qu'on risque ici d'être induit en erreur.

Or il est, en outre, des signes précurseurs du fond, signes dont l'absence doit éveiller les soupçons de l'opérateur, sur l'immobilisation accidentelle de l'outil par un bloc de fortes dimensions. Ces caractères résultent de l'existence, au Hintereisferner, d'une moraine profonde, de 5 à 6 mètres d'épaisseur, formée de matériaux rocheux, de plus en plus grossiers à mesure qu'on se rapproche du lit du glacier.

Lorsque la tarière traversera cette moraine profonde, on observera donc, tout d'abord, que l'eau, sortant du trou de forage, tient en suspension des particules de sable, et cela sans que la vitesse de pénétration subisse une réduction sensible. En entrant dans la zone des petites pierres, le système perforateur accusera ensuite une série d'oscillations verticales, corrélatives d'à-coups dans le mouvement de rotation : la vitesse d'enfoncement affecte alors, pendant quelques mètres, une valeur très réduite, mais bien supérieure cependant à celle à laquelle elle tom-

berait si l'outil attaquait la roche vive. Enfin se produisent les phénomènes d'immobilisation décrits précédemment.

La succession de tous ces caractères représente, semble-t-il, une certitude morale, étayée sur un faisceau de présomptions assez fortes; il faut avouer, cependant, qu'elle ne constitue pas une certitude matérielle.

Il apparaît, d'ailleurs, qu'en l'absence d'un critérium direct, il soit impossible de formuler d'une façon précise une règle générale. L'état actuel de la science ne permet pas, croyons-nous, d'affirmer que la moraine profonde doive se retrouver dans tous les glaciers et qu'elle en soit actuellement un élément constitutif normal. C'est ainsi que M. J. Vallot, dont les explorations, parfois périlleuses, sous la Mer de Glace, ont largement contribué à élucider cette question, exprime, dans un très intéressant mémoire, l'assertion motivée que, « lorsqu'on dépasse la région marginale du glacier, on voit que la glace repose directement sur la roche vive et non sur une moraine profonde interposée ». Tout autres sont les conclusions de M. Blümcke, qui a reconnu, au Vernagtferner, une moraine profonde de 10 à 12 mètres de hauteur.

Ces opinions, en apparence contradictoires, d'observateurs, également dignes de foi, ne sont pas inconciliables, si l'on consent à admettre que la moraine profonde se forme seulement dans certains glaciers, sous des influences topographiques ou physiques que les savants n'ont pas encore su définir.

Obstacles qu'on peut rencontrer dans le forage. — On se heurte parfois, au cours du forage, à des difficultés de nature diverse, sur lesquelles l'expérience acquise par les opérateurs du Hintereisferner peut fournir des données précieuses. On doit, selon M. Hess, distinguer des obstacles personnels et des obstacles naturels.

Obstacles personnels. — Ceux-ci sont, en grande partie, inhérents à l'action du treuil de descente, qui constitue la manœuvre la plus délicate du forage. Si on laisse le câble se dérouler trop vite ou si l'eau de curage n'est pas envoyée en quantité suffisante, les intervalles des dents de la tarière se remplissent de glace; l'empâtement de l'outil peut alors produire, à toute profondeur, des oscillations verticales de la tige de sonde, tendant à imprimer à l'appareil un ébranlement préjudiciable à sa solidité.

Nous venons de voir que, dans les derniers mètres du forage, l'outil, venant à heurter les petites pierres de la moraine profonde, éprouve une série d'oscillations verticales tout aussi fâcheuses que les précédentes, bien que n'étant pas dues à la même cause. C'est là, au Hintereisferner, un signe précurseur de la fin du forage et, par conséquent, un inconvénient inévitable : on s'efforcera seulement, par la manœuvre convenable du treuil, de diminuer l'intensité des chocs que subit la tarière.

Sous les mêmes influences, il peut arriver que l'outil soit immobilisé, soit par coincement résultant d'une pénétration trop brusque, soit par accumulation et compression des débris de glace que le courant d'eau ne suffit pas à entraîner. Il

importe alors d'agir promptement et énergiquement : on doit renforcer aussitôt l'équipe de pompe pour augmenter la quantité d'eau de curage, en même temps qu'on essaie de dégager l'outil par des efforts de rotation dans les deux sens et de traction sur le treuil.

En résumé, la vitesse d'avancement dépend beaucoup plus du volume maximum d'eau refoulée que de la résistance de l'appareil. On peut dire que, dans une certaine mesure, le forage s'effectue dans des conditions de rapidité et de sécurité d'autant meilleures que le débit efficace de la pompe est plus grand.

Obstacles naturels. — La vitesse d'écoulement des couches de glace varie, ainsi que l'on sait, en fonction de la profondeur; il en résulte que le puits creusé par la tarière ne reste pas vertical, mais tend à se déformer plus ou moins vite, selon que le mouvement propre du glacier est lui-même plus ou moins rapide. Il est clair que cette déformation peut, en atteignant une certaine valeur, entraîner de sérieuses complications et même l'impossibilité de poursuivre le sondage.

Aussi doit-on s'efforcer de réduire, autant que possible, la durée des opérations de forage, afin de les terminer avant que la courbure du trou de sonde ne soit sensible. A vrai dire, sur le Hintereisferner, où la vitesse moyenne annuelle n'est pas très considérable, cet inconvénient ne se fait guère sentir, sauf dans les forages à très grandes profondeurs.

Il n'est pourtant pas impossible que le mouvement du glacier soit au moins l'une des causes qui concourent à provoquer, avec une fréquence remarquable, un rétrécissement ou une déformation du trou de sondage vers une profondeur variant de 7 à 9 mètres. Ce fait, d'observation presque constante, tiendrait aussi, selon l'opinion de M. Hess, à l'accumulation locale, puis au regel de débris de glace non éliminés; il est, en effet, à noter que ce rétrécissement se produit à la limite inférieure de la région sur laquelle la température extérieure peut exercer son influence. MM. Hess et Blümcke avaient cherché à se prémunir contre cet obstacle en augmentant quelque peu, jusqu'à une profondeur de 10 à 12 mètres, le diamètre du trou de forage : ils ont reconnu que cette précaution était, en général, inutile et que, grâce à sa denture tournée vers le haut, la tarière était en état de se frayer à nouveau, sans trop de difficultés, sa route vers la surface du glacier.

Les crevasses constituent le plus sérieux obstacle naturel qui puisse venir compromettre, parfois très gravement, le succès des opérations. Il ne s'agit pas seulement de la rencontre, par l'outil, de crevasses préexistantes : nous avons vu, à propos du choix de l'emplacement, qu'on s'efforçait de se tenir en dehors de leur trajet probable. Nous voulons surtout parler des fissures qui se forment dans la masse du glacier, au cours même du forage, et qui sont, jusqu'à un certain point, d'autant plus nuisibles qu'elles sont plus étroites.

En effet, l'eau de curage s'écoule alors par ces fissures, au lieu de remonter à la surface : si la crevasse est assez large pour livrer, de plus, issue aux débris de glace, ceux-ci continuent à être entraînés par l'eau, sans que la rencontre ait de conséquences trop fâcheuses. Mais si la faible largeur de la fissure permet le seul passage de l'eau, les débris de glace viennent s'accumuler en un même point : ils

forment bientôt un bouchon, dont l'épaisseur va sans cesse en croissant et qui, par l'effet de la compression et du regel, oppose une résistance de plus en plus grande aux mouvements de l'outil qui finit par être immobilisé. Il faut alors se résoudre à abandonner le forage commencé et à remonter au plus tôt les tubes de sonde, ce qu'on a parfois beaucoup de peine à réussir. L'accident se produit assez fréquemment, sous une forme atténuée, au voisinage immédiat du fond : le trou se vide peu à peu et on est obligé de pomper énergiquement pour compenser les pertes et maintenir l'écoulement d'eau à la surface du glacier. Il est alors généralement possible de terminer le forage. Cependant, on risque, ici encore, de voir échouer tous les efforts tentés pour relever l'outil : MM. Hess et Blümcke ont dû sacrifier ainsi une longueur considérable de tubes de sonde, à la fin d'un de leurs précédents forages.

IV. — OBSERVATIONS TECHNIQUES ET NUMÉRIQUES RELATIVES AUX SONDAGES DE 1906.

Deux sondages seulement ont été effectués devant nous, sur le Hintereisferner. En effet, pour diverses raisons, MM. Hess et Blümcke ne comptaient pas utiliser leur appareil dans leur campagne de 1906, et c'est, en majeure partie, pour nous permettre d'étudier leur technique qu'ils ont modifié leurs intentions premières.

La place choisie pour les expériences était située à 3.500 mètres du front du glacier, entre la rive gauche et la moraine médiane issue de la Langtauferspitze. Cet emplacement se trouve à une altitude d'environ 2.730 mètres, la plus élevée à laquelle MM. Hess et Blümcke aient encore opéré (phot. 18, pl. VII).

Le premier sondage, pratiqué à une distance de 120 mètres de la rive gauche, accusa une épaisseur de glace de 80 m. 30. Le second, à 87 mètres de la même rive et sur le même profil, se prolongea jusqu'à une profondeur de 91 m. 80.

Nous allons résumer brièvement les incidents opératoires qui se sont produits au cours des deux forages : ces notes concises auront l'avantage de matérialiser en quelque sorte et de compléter les indications générales que nous avons précédemment données.

Premier sondage (28 et 29 juillet). — Le montage de l'appareil se termine en notre présence dans la matinée du 28 juillet. Le forage commence à 11 h. 15 et on travaille sans interruption jusqu'à 4 h. 50, heure à laquelle on a atteint une profondeur de 51 mètres. Le ciel étant couvert, l'eau de fusion a été peu abondante et on est contraint de suspendre le travail.

Le dimanche 29 juillet, les ouvriers sont descendus à Vent dès l'aurore et ne remontent au Hochjochospiz que vers 10 heures. Le forage reprend à midi 50 et se poursuit sans incident : à 4 h. 25, on est à 79 mètres de profondeur. A ce moment, pendant un arrêt de la pompe, nécessité par l'ajustage d'un nouveau tube, l'eau baisse dans le trou de forage : l'outil a rencontré une fissure par où l'eau s'écoule. Les quatre ouvriers pompent énergiquement, l'eau ne réapparaît pas à

la surface. On met l'outil en mouvement. Bientôt, il se produit des à-coups et l'eau arrive, d'abord boueuse, puis mélangée de glace : on perce de la glace sableuse, signe précurseur du fond. Les à-coups se multiplient et l'eau disparaît de nouveau; quatre hommes actionnent la pompe, dont la manœuvre devient extrêmement pénible. La tarière tourne en râclant avec un bruit sourd qui se transmet aux engrenages d'angle, le câble métallique cesse de se tendre : c'est le fond (4 h. 40).

L'eau n'a pas reparu; aussi va-t-on rencontrer, pendant quelques mètres, d'assez grandes difficultés pour remonter les tubes de sonde, parce que l'eau, en s'écoulant par la fissure du fond, a laissé les débris de glace s'accumuler autour de l'outil.

Il est inutile de continuer à pomper. On ajuste la troisième manivelle, calée directement sur l'axe de l'engrenage d'angle vertical. Deux hommes se placent au treuil et trois autres aux manivelles du système rotatif. On ne peut pas faire tourner la tarière et on parvient à grand-peine à la remonter de 50 centimètres, le bois du tambour de treuil craque et se hache sous l'effort. Les cinq hommes se réunissent à l'appareil rotatif : la courroie patine. La tarière est immobilisée : on ne peut plus ni la faire tourner, ni la remonter, ni même la descendre.

Sur l'ordre de M. Hess, on dévisse le joint qui relie le bec-raccord au tuyau de refoulement de la pompe; on place le tuyau à même sur le glacier, son extrémité libre au-dessus du trou de forage dans lequel on envoie de l'eau. Le trou se remplit, on cesse de pomper. L'eau s'écoule peu à peu en faisant fondre le tampon de glace qui entoure l'outil. On emplit de nouveau le trou et on détend le câble, dans l'espoir que les tubes de sonde descendront sous leur propre poids : c'est en vain.

Avec une poutre de bois, on frappe sur la glissière; la sonde descend lentement. On peut alors faire tourner assez facilement la tarière et on réussit, en continuant le mouvement de rotation et en agissant sur le treuil, à désagréger le tampon de glace et à relever la sonde de toute la longueur du câble disponible (5 h. 15).

Le relevage s'effectue ensuite sans encombre à l'aide des accessoires appropriés; il se termine à 6 h. 35. La profondeur atteinte a été de 80 m. 30.

Second forage (30 et 31 juillet, 1^{er} août). — Pendant la matinée du 30 juillet, l'appareil est démonté et transporté à la place choisie pour le nouveau sondage. Le montage est rapidement mené et la tarière pénètre dans le glacier à 1 h. 55. Une légère réparation au contre-écrou du bec-raccord nécessite un arrêt de 10 minutes, de 4 h. 30 à 4 h. 40. Le travail est suspendu à 6 h. 4 : l'outil s'est enfoncé de 41 mètres.

Le 31 juillet, le forage reprend à 9 h. 40, après les préliminaires d'usage. A midi 50, le trou commence à se vider pendant le montage d'un tube; on le remplit presque aussitôt en pompant. On est à 69 mètres.

M. Hess donne une heure de repos aux ouvriers, de 1 heure à 2 heures. Lorsque nous revenons, le trou s'est vidé; on pompe : au bout de 3 minutes l'eau déborde.

On recommence à forer à 2 h. 10. A chaque montage de tube, l'eau baisse; on pompe alors, sans tourner, jusqu'à ce qu'elle revienne. A 4 heures, on a atteint une profondeur de 84 mètres.

La provision de tubes étant épuisée, les ouvriers vont en chercher une réserve

sur la moraine (phot. 24, pl. IX); le travail reprend à 4 h. 35. Vers 5 h. 10, plusieurs à-coups se produisent, arrêts brusques de la tarière causés par la rencontre de petites pierres. On est à 88 mètres : M. Hess annonce le fond à 2 mètres environ.

La manœuvre de la pompe devient très pénible; il n'y a plus d'à-coups pendant les 40 centimètres qui suivent, mais le forage est extrêmement dur, bien que M. Hess ne lâche plus que très lentement le câble. Les arrêts se renouvellent, la courroie patine parfois. A 6 h. 10, sous 91 mètres, le fond n'est pas encore atteint. Comme il ne reste plus de tubes disponibles, on ne peut pas continuer; d'ailleurs l'eau commence à manquer.

Le 1^{er} août, nous apportons de nouveaux tubes et le forage continue à 9 h. 45. Les chocs qu'éprouve l'outil sont plus fréquents; ils sont aussi plus intenses et font patiner la courroie. Vers 10 h. 5, les engrenages produisent par intervalles un bruit sourd et non plus un son clair; en outre, le mouvement de rotation n'est plus uniforme, mais s'effectue par saccades; le câble reste encore tendu. A 10 h. 9, le bruit sourd devient continu et le câble se détend : la tarière repose sur le lit du glacier.

On soulève les tubes de 60 centimètres environ et on pompe pour achever le curage du trou. Les débris de glace remontent, mêlés de sable et de paillettes de mica. A 10 h. 15, l'eau perd sa limpidité et sort boueuse, tenant en suspension de fines particules de sable et d'argile. A 10 h. 20, il n'y a plus aucun débris de glace entraîné.

On procède au relevage qui ne présente, cette fois, aucune difficulté et qui est terminé à midi. La profondeur atteinte est de 91 m. 80.

Par une aimable attention, MM. Hess et Blümcke veulent confier au glacier le souvenir des trop courtes journées que nous avons passées ensemble. Une feuille de zinc, portant en relief la date du forage et nos quatre noms, est placée dans un des tubes de fer et celui-ci est abandonné à l'ouverture béante dans laquelle il s'engouffre, avec un clair bruissement. Un coup sourd, dont les parois d'un tuyau de 100 mètres amplifient l'intensité, nous apprend que notre message est arrivé à destination.

Observations numériques. — En laissant de côté l'accroissement régulier du poids des tiges de sonde, dont l'action est contrebalancée par la manœuvre du treuil de suspension, les seuls facteurs, qui aient une influence sur le forage, sont : la vitesse de rotation de la tarière et le volume de l'eau envoyée par la pompe dans le système perforateur. Il est aisé de les mesurer.

Or, jusqu'à une profondeur de 60 mètres, ces deux quantités sont sensiblement constantes; il est même remarquable que nous ayons pu, au deuxième forage, retrouver, pour une même profondeur, des valeurs numériques absolument égales à celles que nous avons observées pendant le premier forage. Mais, à partir de 60 mètres, le débit de la pompe décroît progressivement, tandis que la vitesse de rotation de la tarière ne subit qu'une diminution beaucoup plus faible.

Dans le tableau suivant, qui résume nos observations, l'unité de temps est la minute.

Profondeur atteinte	Vitesse de rotation de la tarière	Coups de piston doubles	Débit de la pompe
mètres	lours	coups	litres
10	74	30	51,4
20	74	30	51,4
30	74	30	51,4
50	72	28	48,0
65	72	28	48,0
70	»	24	41,1
76	»	23	39,4
80	64	»	»
85	»	12	20,6

Ainsi qu'il est à prévoir, les variations de ces facteurs, en fonction de la profondeur, ont une répercussion manifeste sur la rapidité du forage. Celle-ci reste à peu près constante jusqu'à 60 mètres, profondeur à partir de laquelle elle diminue progressivement. C'est ce qui résulte immédiatement de l'examen des tableaux ci-dessous, qui ont été dressés en ne tenant compte que du temps de travail effectif, c'est-à-dire en retranchant les heures de repos ou de suspension de travail.

Premier forage.

Temps	Profondeur atteinte	Avancement à l'heure
heures	mètres	mètres
1	9,0	9,0
2	17,0	8,0
3	28,0	11,0
4	37,7	9,7
5	46,0	8,3
6	54,6	8,6
7	63,2	8,6
8	71,0	7,8
9	77,8	6,8
9h 25m	80,3	6,0

Deuxième forage.

Temps	Profondeur atteinte	Avancement à l'heure
heures	mètres	mètres
1	12,0	12,0
2	21,2	9,2
3	30,2	9,0
4	39,2	9,0
5	48,3	9,1
6	57,1	8,8
7	66,6	9,5
8	74,6	8,0
9	81,2	6,6
10	87,3	6,1
11	91,0	3,7
11h 25m	91,8	1,9

On voit que, pour des épaisseurs de glace voisines de 100 mètres, le fond est

atteint, en raison d'un avancement moyen de 8 mètres environ par heure de travail effectif (8 m. 52 dans le premier forage; 8 m. 03 dans le second). L'avancement maximum réalisé en une heure est de 11 à 12 mètres, à des profondeurs inférieures à 30 mètres.

Nous avons été surpris de la rapidité avec laquelle, une fois le forage terminé, les ouvriers procèdent au relèvement et au démontage des tubes de sonde. Les 80 mètres du premier forage ont été sortis en 1 h. 20, soit avec une vitesse de 60 mètres à l'heure; le relèvement des 92 mètres du second forage a demandé 1 h. 35, ce qui représente une vitesse, approximativement égale, de 58 m. 10 à l'heure.

Nous avons enfin porté notre attention sur la part qu'il convient de réserver au forage proprement dit, abstraction faite des manœuvres diverses ne contribuant qu'indirectement à la pénétration de l'outil dans la glace.

Envisageant, en effet, le processus continu que nous avons précédemment décrit, nous appellerons « cycle de forage » la série des opérations élémentaires qui se succèdent, dans un ordre invariable, pour amener l'adjonction périodique de tubes l'un à la suite de l'autre. Nous prendrons comme point initial du cycle le moment où, un tube A étant arrivé à fin de course, on se prépare à visser un nouveau tube B; le cycle sera terminé lorsque, le tube B étant à son tour à fin de course, on se préparera à y ajouter un troisième tube C.

Ceci dit, nos mesures ont porté sur une succession de trois cycles du deuxième forage correspondant à une profondeur de 50 mètres : les heures étaient pointées au début de chacune des positions ou manœuvres indiquées sommairement ci-après en regard des lectures de temps.

	1 ^{er} Cycle	2 ^{me} Cycle	3 ^{me} Cycle
Fin d'un tube : curage sans rotation.....	11 h 9 ^m	11 h 21 ^m	11 h 34 ^m
Arrêt : adjonction d'un tube.....	» 11	» 24	» 36
Tube en place : glissière en haut.....	» 15	» 29	» 40
— en bas.....	» 17 1/2	» 30 1/2	» 41 3/4
— en haut.....	» 17 3/4	» 30 3/4	» 42
— en bas.....	» 19 3/4	» 32 3/4	» 44 3/4
— en haut.....	» 20	» 33	» 45
Glissière en bas : fin d'un tube.....	» 21	» 34	» 46

Les temps (en minutes) dépensés dans chacune des opérations élémentaires du cycle sont donc les suivants :

	1 ^{er} Cycle	2 ^{me} Cycle	3 ^{me} Cycle
Curage sans rotation.....	2 ^m	3 ^m	2 ^m
Adjonction d'un tube.....	4	5	4
Forage.....	2 1/2	1 1/2	1 3/4
Manœuvre de glissière.....	» 1/4	» 1/4	» 1/4
Forage.....	2	2	2 3/4
Manœuvre de glissière.....	» 1/4	» 1/4	» 1/4
Forage.....	1	1	1

Ces résultats nous autorisent à considérer un cycle moyen que nous décomposerons ainsi :

Temps employé au curage.....	2 ^m 1/2
— à l'adjonction du tube.....	4 1/2
— à la manœuvre de la glissière.....	» 1/2
— au forage.....	5
Durée du cycle.....	12 ^m 1/2

Nous sommes donc amenés à cette conclusion que, sur 12,5 minutes de travail effectif, 5 minutes seulement sont employées au forage proprement dit; cette constatation n'est pas sans intérêt, comme nous le verrons plus loin.

V. — CONCLUSIONS.

Les forages pratiqués en notre présence avec un plein succès, aussi bien que ceux effectués les années précédentes en Tirol, ont établi que la méthode de MM. Hess et Blümcke est, par son principe et par sa réalisation, fort bien appropriée à son but. L'appareil du Hintereisferner est actuellement le seul modèle connu qui ait fait ses preuves et dont on soit en droit d'attendre un service régulier, en ce qui concerne les sondages à grande profondeur, limités au bassin d'ablation. Il se présente donc comme le type sur lequel devra être calqué tout appareil similaire, sans que nous prétendions exclure cependant la possibilité de changements dans quelques détails de construction.

Ces changements peuvent être conçus, soit dans le but de supprimer de très légères défauts, soit en vue d'introduire des perfectionnements, sur la valeur desquels l'expérience aura ensuite à se prononcer.

Les modifications, qui correspondraient à une amélioration de fonctionnement ou de rendement des organes actuels, sont peu nombreuses et peu importantes. Leur énumération paraîtrait peut-être oiseuse si l'on n'avait égard à l'isolement et aux difficultés d'accès du lieu des opérations : la plus légère avarie, que, dans un village, de faibles ressources permettraient de réparer aisément, peut, sur un glacier, se transformer en un accident irrémédiable, entraînant plusieurs jours d'arrêt et des frais considérables.

Il arrive fréquemment que le bec-raccord et le tube de fer, qui sont vissés l'un sur l'autre, se séparent, soit parce que le contre-écrou se dévisse, soit parce que le système suspenseur offre une résistance trop grande à la rotation : il serait bon d'employer un dispositif propre à éviter cet ennui, dont la répétition occasionne une perte de temps et une usure notable des filets du contre-écrou.

De même, les broches d'arrêt des bras de pompe ont une tendance fâcheuse à sortir de leur logement : il suffirait de les goupiller pour remédier à cet inconvénient.

La longueur du tuyau de refoulement, en caoutchouc entoilé, pourrait avantageusement être portée à 4 mètres, afin d'éviter les coudes brusques qui produisent des pertes de charge, sans parler des déchirures possibles.

Par contre, il semble qu'une longueur de 8 mètres, pour le câble métallique, soit suffisante pour parer à toute éventualité. En diminuant aussi la hauteur du tam-

bour de treuil, sur lequel s'enroule le câble, on réaliserait un gain appréciable sur le poids de cette partie de l'appareil.

Nous arrivons maintenant aux perfectionnements, entraînant une modification dans les organes essentiels.

Tout d'abord, du principe même du curage continu par un courant d'eau envoyé sous pression au front d'attaque, il paraît résulter que le dispositif de MM. Hess et Blümcke est susceptible d'amélioration. Actuellement, en effet, l'orifice par lequel l'eau s'échappe de la tarière se trouve à la partie supérieure de celle-ci, c'est-à-dire à 20 centimètres environ des dents de fraisage; il est évident qu'à débit égal, le curage serait plus énergique, si l'orifice de sortie de l'eau était très proche des dents de la tarière. Ce défaut théorique n'a pas échappé à M. Mercanton et nous pensons comme lui qu'il est possible, avec une moindre consommation d'eau, de conserver la même valeur à l'évacuation des débris de glace, ou, avec la même consommation, d'obtenir un rendement supérieur.

Nous croyons cependant que la question est plus complexe et il n'est pas sûr, comme semble le dire M. Mercanton, que cette modification entraîne une diminution dans la puissance mécanique absorbée par la pompe. Aux abords immédiats du front d'attaque, les débris de glace doivent s'accumuler et former un magma assez dense que le courant d'eau désagrège par affouillement dans le dispositif actuel, mais qui risque d'opposer une résistance beaucoup plus grande à la sortie de l'eau, si celle-ci se produit à la partie inférieure du magma sans cesse renouvelé.

On ne saurait d'ailleurs tirer, à cet égard, aucun enseignement des expériences de MM. Dutoit et Mercanton. Ces savants ont bien, en effet, réalisé, avec un débit de 3 litres par minute et à l'aide d'une tarière à orifice inférieur, un avancement moyen de 3 m. 10 à l'heure; mais la profondeur maximum atteinte a été très faible, 12 m. 25, et rien ne permet d'affirmer qu'à une plus grande profondeur et pour une vitesse de pénétration de 7 à 8 mètres, il ne se produirait pas une obstruction de l'orifice de curage ou, tout au moins, une augmentation notable dans la résistance opposée par le magma à la sortie du courant d'eau.

Aussi bien, envisageons-nous seulement cette éventualité comme possible, mais non comme certaine, et il serait désirable de procéder sur ce point à des expériences comparatives. Au reste, le perfectionnement proposé par M. Mercanton est déjà justifié par le fait seul que, pour une dépense d'énergie approximativement égale, on éliminerait la même quantité de glace avec un moindre volume d'eau.

Dans un ordre d'idées analogue, le remplacement de la force humaine par une force mécanique, telle que celle d'un moteur à pétrole, paraît s'imposer, dès l'instant que les tâtonnements inévitables du début ont fait place à une méthode en quelque sorte définitive. Tous ceux qu'intéressent les forages glaciaires à grande profondeur ont vu là une amélioration évidente de la technique opératoire : MM. Hess et Blümcke sont d'ailleurs en pourparlers avec leur constructeur pour l'achat d'un nouvel appareil, qui sera actionné par un moteur à explosions et qui fonctionnera probablement cette année sur le Hintereisferner.

Il faut cependant se garder d'un optimisme irraisonné et il nous semble opportun

d'examiner dans quelle mesure cette substitution constituerait un progrès réel et de préciser la nature des avantages qu'on en retirerait.

Jusqu'à des profondeurs voisines de 100 mètres, les frais de main-d'œuvre conserveraient la même valeur. En effet, le montage et le démontage de l'appareil, l'ajustage des tubes et leur relevage exigent une équipe minimum de quatre ouvriers, dont l'entretien reste nécessaire. Ce n'est donc qu'à partir du moment où l'équipe de renfort sera obligatoire, c'est-à-dire pour les forages supérieurs à 100 mètres, que l'emploi du moteur à pétrole réalisera une économie directe de main-d'œuvre.

Ne convient-il pas, de même, de formuler quelques réserves sur le bénéfice indirect qui résultera de l'augmentation de puissance disponible et, par suite, de l'augmentation de vitesse de forage ? C'est ce que nous allons chercher à établir.

Nous avons montré précédemment que, dans la succession périodique des opérations comprises entre deux adjonctions de tubes, processus auquel nous avons donné le nom de cycle de forage, le temps pendant lequel l'outil perforait effectivement la glace était de 5 minutes, alors que la durée totale du cycle était de 12,5 minutes. La longueur d'un tube étant de 2 mètres, l'avancement moyen à l'heure est ainsi égal à $\frac{60}{12,5} \times 2 = 9$ m. 6.

Supposons maintenant le moteur, dont nous disposons, assez puissant pour que, sous l'effet d'une rotation rapide et d'un refoulement d'eau énergique, la tarière s'enfonce de la longueur d'un tube, soit 2 mètres, en 2,5 minutes, au lieu de 5 minutes. La durée du cycle s'abaisserait à 10 minutes et l'avancement moyen à l'heure serait égal à $\frac{60}{10} \times 2 = 12$ mètres.

Il en résulte que, si nous parvenions à doubler la vitesse effective de pénétration de l'outil, la vitesse moyenne d'avancement n'augmenterait que de 1/4 de sa valeur primitive. L'accroissement de rendement sera donc très faible et la substitution en somme peu avantageuse, tant que l'avancement moyen, obtenu avec la force humaine, conservera une valeur voisine de 9 mètres, c'est-à-dire jusqu'à une profondeur de 70 mètres environ.

Mais nous avons vu que la vitesse moyenne de pénétration, relevée au cours des deux forages effectués en notre présence, diminuait assez rapidement lorsque la profondeur atteinte dépassait 70 mètres. C'est ainsi qu'à 90 mètres, elle n'est plus que de 5 mètres environ. La durée du cycle de forage s'élève alors à 24 minutes, sur lesquelles 16 minutes, et non plus seulement 5, sont consacrées au forage proprement dit. Il est probable que l'emploi d'un moteur à pétrole permettrait d'assurer à l'outil une vitesse de pénétration à peu près constante, de sorte que la durée du cycle pourrait être ramenée à 13 minutes. Cette durée correspond à un avancement moyen de 9 m. 2 à l'heure, qui est sensiblement le double de la vitesse actuellement réalisable.

Ainsi, au point de vue de la main-d'œuvre comme à celui de la rapidité des opérations, la substitution de la force mécanique à la force humaine ne présente que des avantages peu marqués, si les sondages ne doivent pas dépasser 80 mètres. Dans le cas général des sondages à plus grande profondeur, elle constitue, par contre, un progrès réel, dont la réalisation nous paraît hautement désirable.

Au reste, il est possible de préciser quelles sont, en l'espèce, les meilleures con-

ditions d'utilisation de la nouvelle puissance motrice. Nous avons montré que les variations relatives de la vitesse de rotation de la tarière et du débit de curage sont très différentes : à 80 mètres, la diminution de la vitesse de rotation n'est que le septième de la vitesse initiale, alors que la diminution du débit de curage atteint les 3/5 du débit primitif. La force, produite par le moteur à pétrole, devra donc servir, avant tout, à améliorer le rendement de la pompe, rendement dont l'insuffisance est ici manifeste. Il est d'ailleurs vraisemblable que la vitesse de rotation de l'outil reprendra du même coup son régime normal : on ne peut guère, en effet, trouver au décroissement de vitesse observé d'autre explication que l'engorgement du trou de sonde par les débris de glace.

Malgré tout, les perfectionnements, dont nous venons de discuter la valeur, ne permettront probablement pas de dépasser la vitesse de 12 mètres à l'heure, que les « temps perdus » du cycle de forage semblent fixer comme limite supérieure; ils contribueront seulement à en assurer la constance aux grandes profondeurs.

M. Hess croit pourtant qu'il est possible d'atteindre une vitesse d'avancement plus grande, en augmentant la hauteur de la chèvre et en employant des tubes de sonde de 2 m. 50 de longueur : on gagnerait ainsi un cycle sur cinq. En outre, cette modification aurait pour conséquence d'abaisser le prix de revient du mètre de tube, dont le manchon et le filetage représentent une part importante.

Enfin, il ne faut pas perdre de vue que la méthode actuelle est limitée dans son application au bassin d'ablation, qui peut, seul, fournir l'eau nécessaire au curage. En admettant même que les changements préconisés aient pour effet de diminuer la consommation de l'eau nécessaire au fonctionnement de l'appareil et de rendre possibles les sondages glaciaires à des altitudes relativement élevées, le bassin d'alimentation n'en reste pas moins, jusqu'ici, une région malheureusement interdite aux investigations des glaciéristes ou des ingénieurs.

Quoi qu'il en soit, MM. Hess et Blümcke ont réussi à doter la science d'un procédé de forages glaciaires, dont la valeur pratique est désormais établie d'une façon indiscutable. Ils ont déployé, pour y parvenir, de rares qualités de persévérance, de sagacité et de désintéressement : le succès leur était bien dû.

Mais leur œuvre serait peu féconde, s'ils étaient seuls à faire fructifier le champ qu'ils ont ouvert à l'activité des savants. L'intérêt que le Gouvernement français a témoigné à leurs travaux semble avoir, à cet égard, une signification non équivoque.

Grenoble, juillet 1907.

G. FLUSIN et C. BERNARD.

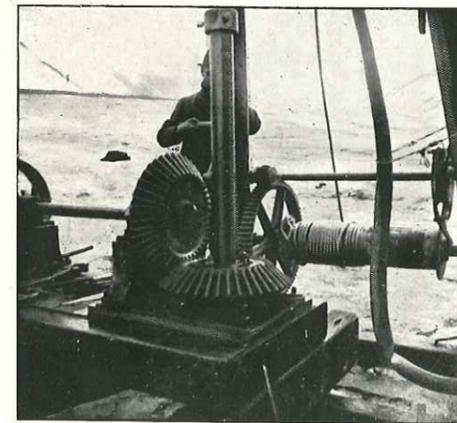
PLANCHE I



N° 1

Pompe d'alimentation et treuil de retenue.

Phot. Bernard



N° 2

Moteur rotatif.

Phot. Flusin

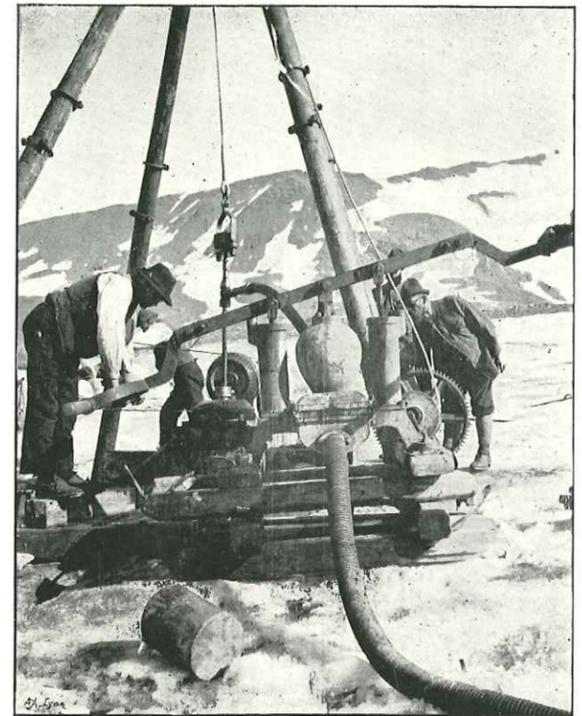


N° 3

Plateau à engrenages d'angle

Phot. Flusin

PLANCHE II

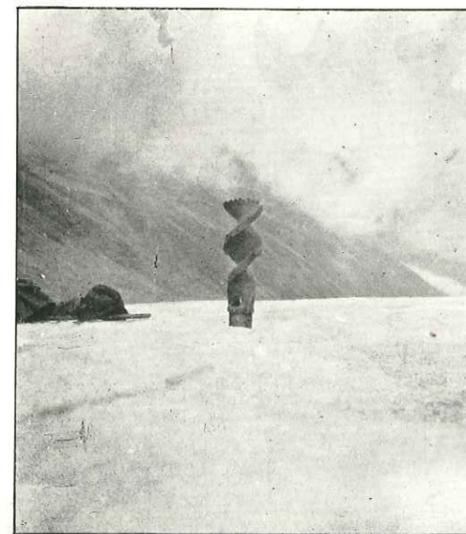


N° 4

Pompe d'alimentation.

Phot. Bernard

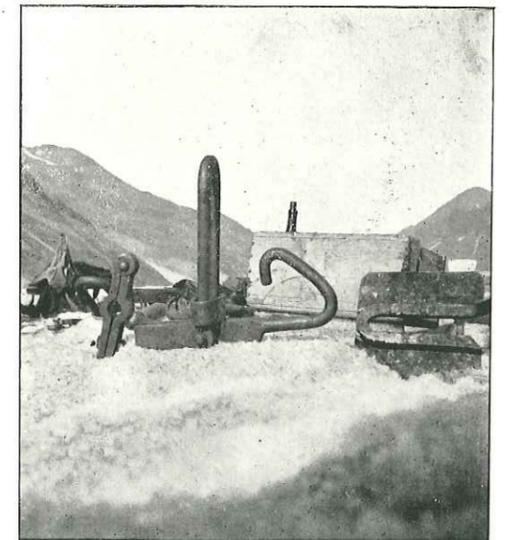
a | b | c



N° 5

Tarière hélicoïdale.

Phot. Bernard



N° 6

Outils de retenue et de relevée.

Phot. Bernard

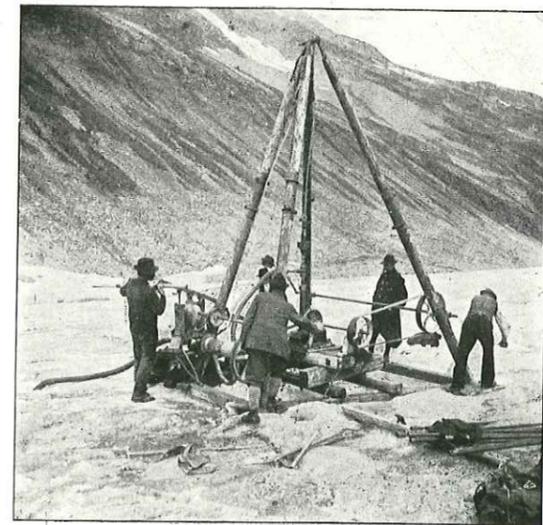
PLANCHE III



N° 7

Transport par traineau.

Phot. Bernard

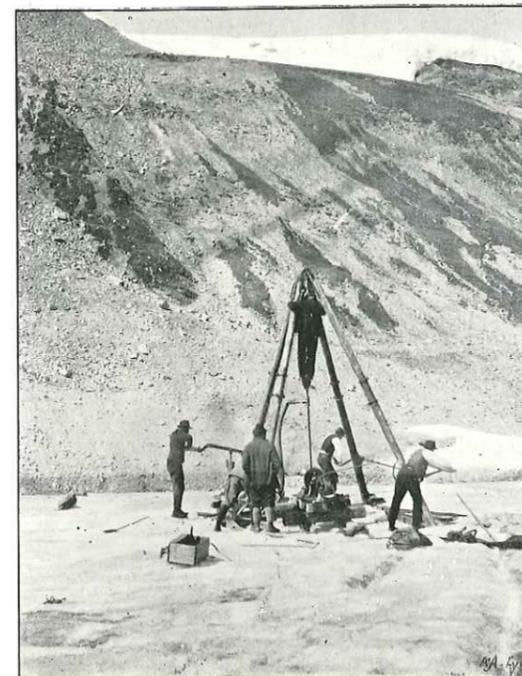


N° 8

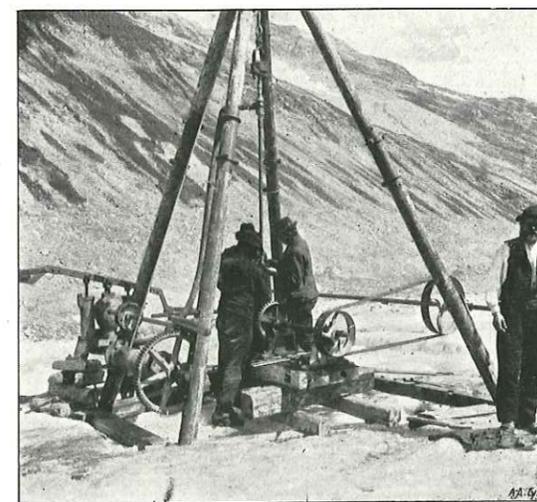
Positions de forage.

Phot. Flusin

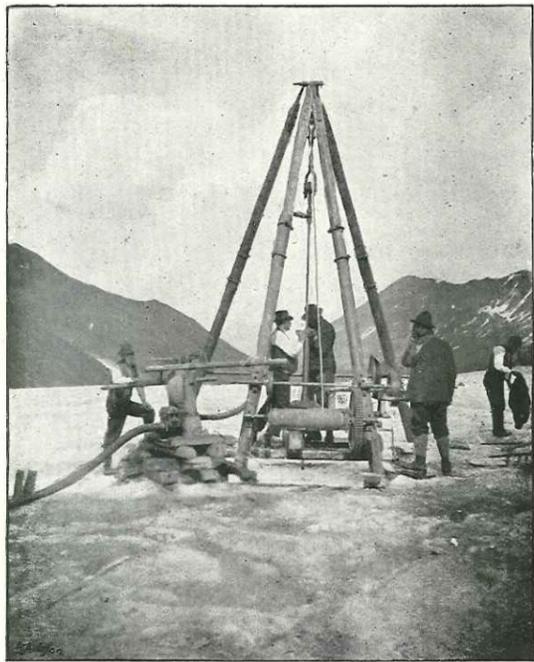
PLANCHE IV



N° 9 Commencement du forage. Phot. Bernard



N° 10 Centrage de la glissière. Phot. Flusin



N° 11

Suspension du forage.

Phot. Bernard



N° 12

Tube à bout de course.

Phot. Bernard

PLANCHE VII



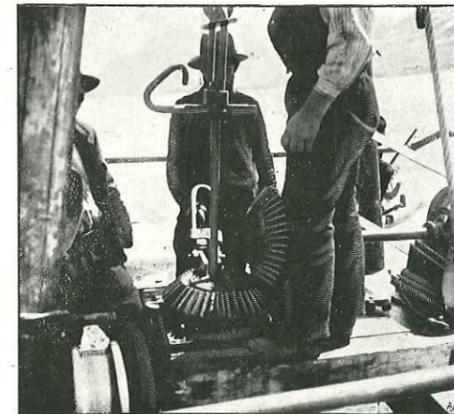
N° 16 Adjonction d'un tube. Phot. Flusin



N° 17 Vissage d'un tube. Phot. Flusin



N° 18 Emplacement du 2° forage. Phot. Flusin



N° 19 Positions de relevée. Phot. Flusin

PLANCHE VIII



N° 20

Dispositif de relevée.

Phot. Bernard

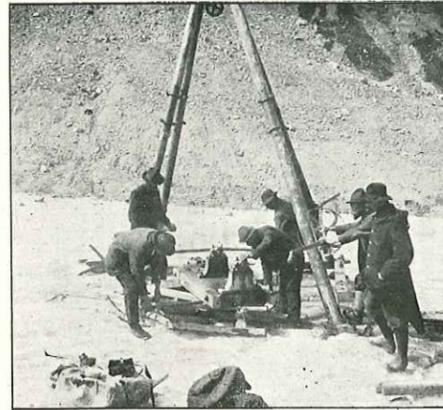


N° 21

Dévisage d'un tube.

Phot. Flusin

PLANCHE IX



N° 22 Phot. Flusin
Démontage de l'appareil.



N° 23 Phot. Flusin
Station d'hivernage.

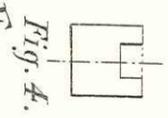


N° 24 Phot. Flusin
M. Hess, devant l'appareil au repos.

Plan général du cadre trapézoïdal et des montants de la chèvre. — Coupes diverses.

Échelle $\frac{1}{15}$

Coupe E.F.



Coupe C.D.

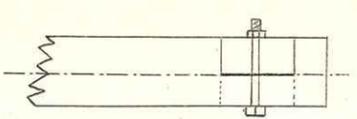


Fig. 3.

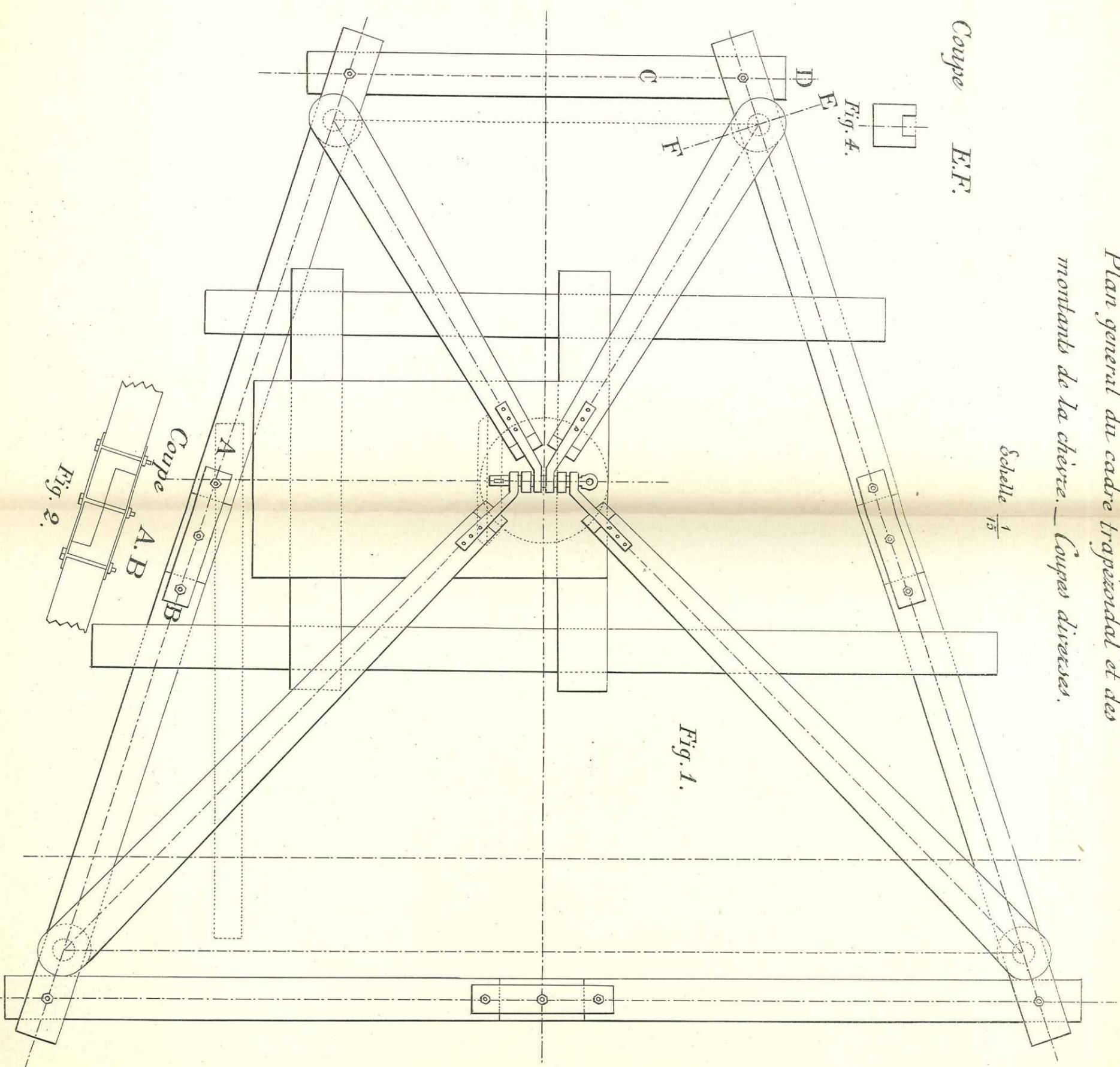
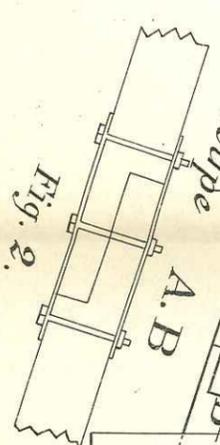


Fig. 1.

Coupe A.B.

Fig. 2.



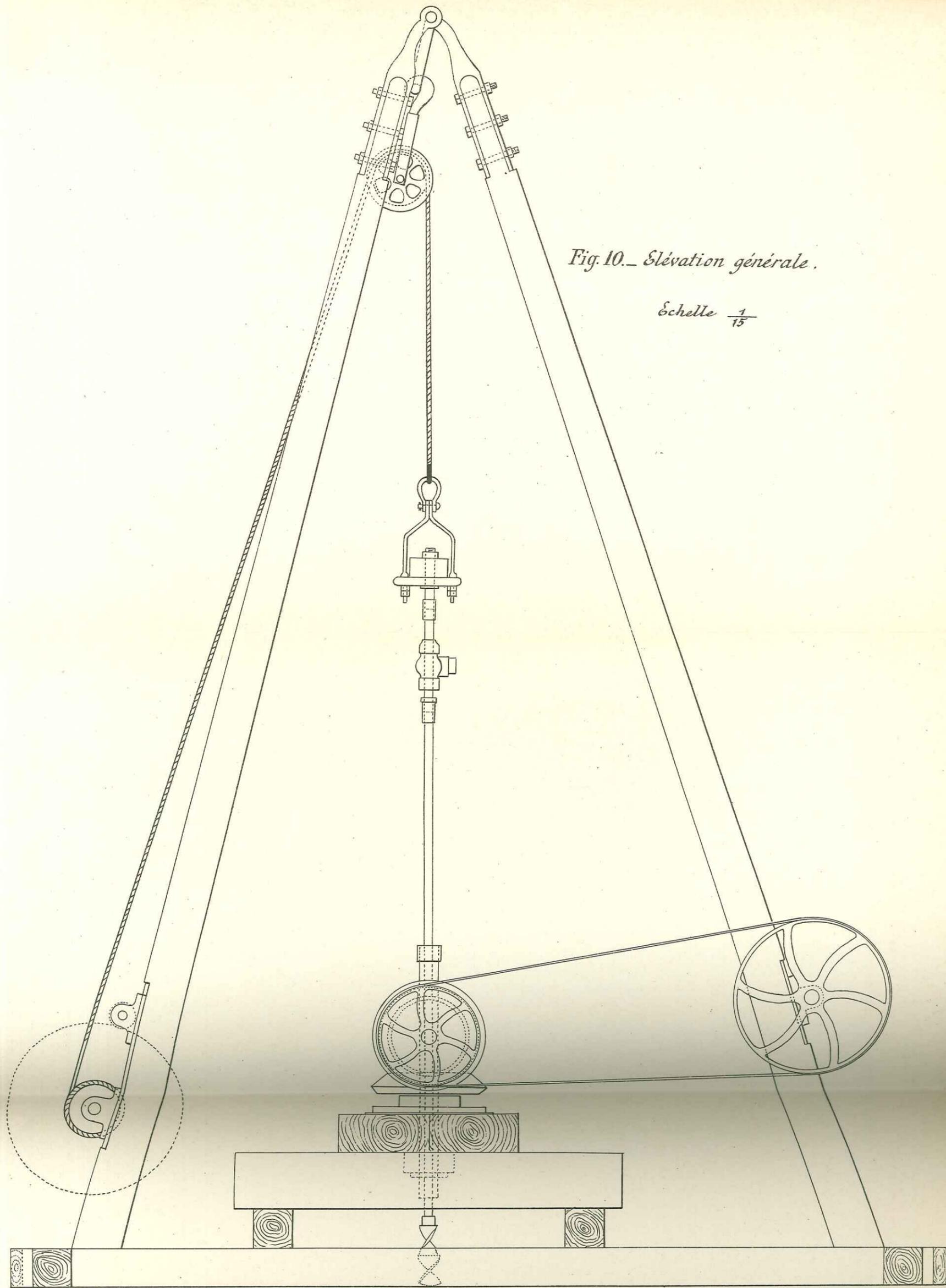


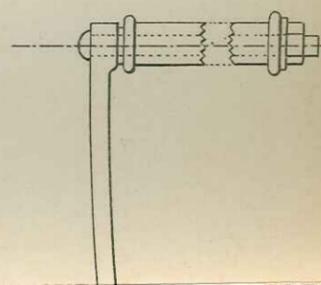
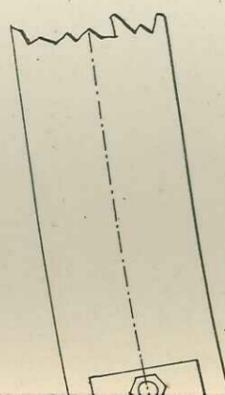
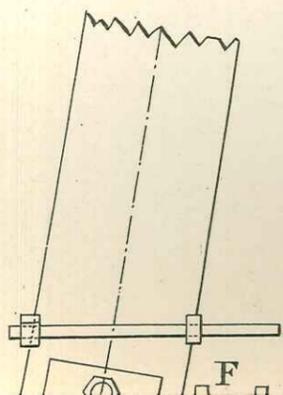
Fig. 10. — Élévation générale.

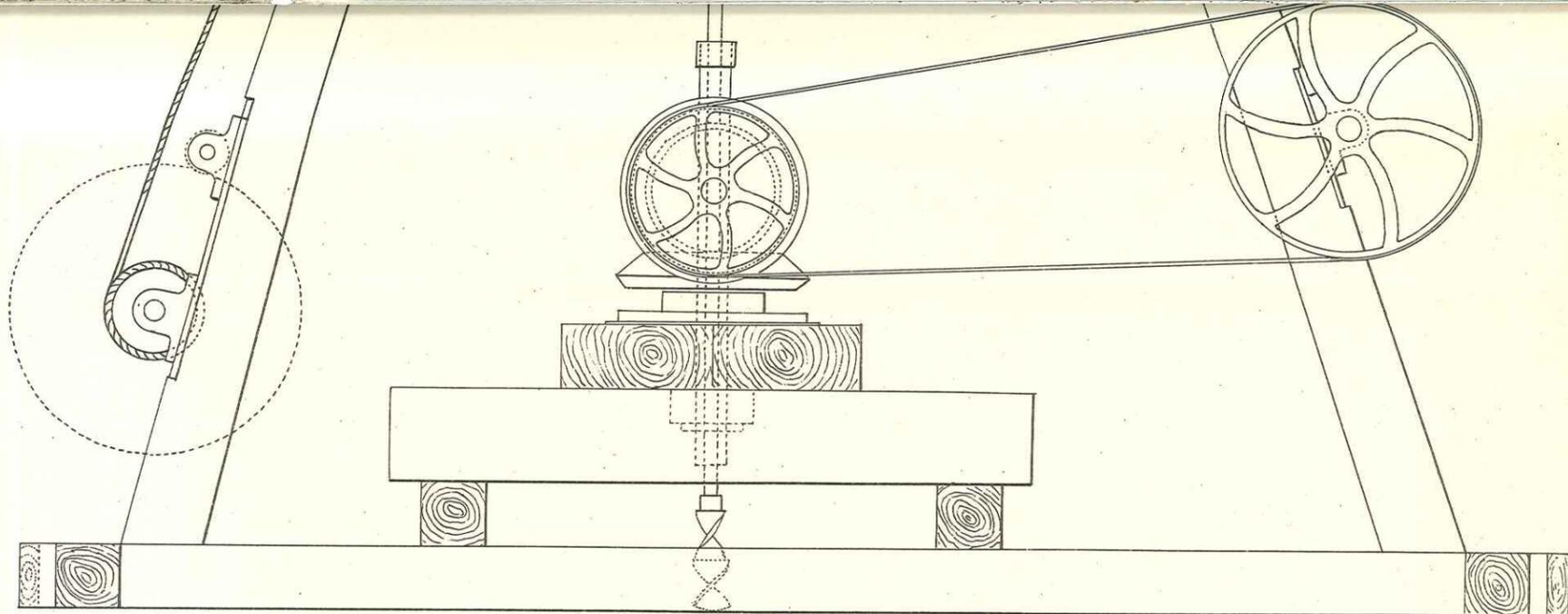
Échelle $\frac{1}{15}$

Détail du treuil de manœuvre
Rabattement sur le plan horizontal

Échelle $\frac{2}{15}$

Fig. 11.





Détail du treuil de manœuvre
Rabattement sur le plan horizontal

Echelle $\frac{2}{15}$

Fig. 11.

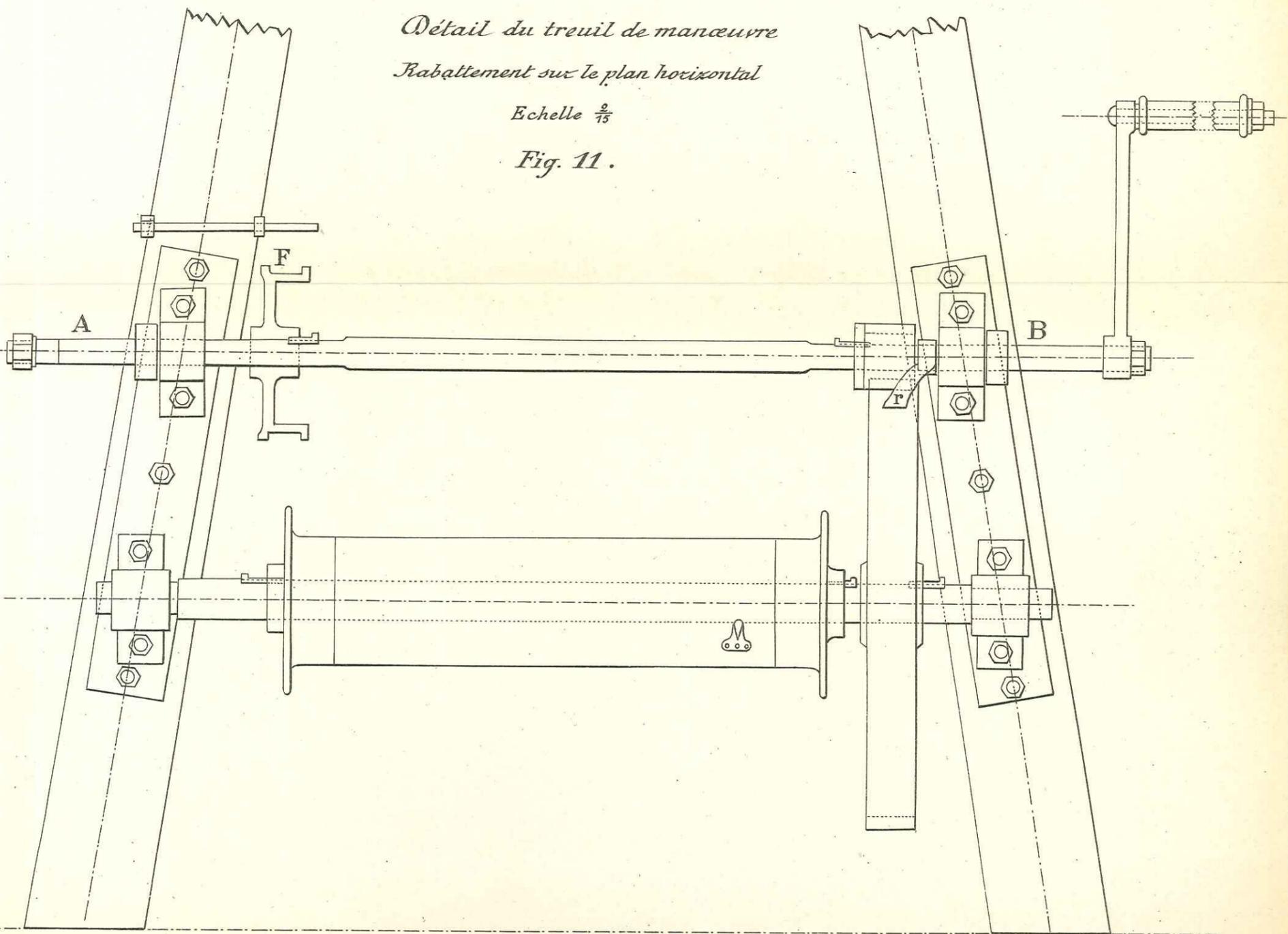


Fig. 16. — Élévation de l'appareil rotatif à bras.

Échelle $\frac{2}{15}$

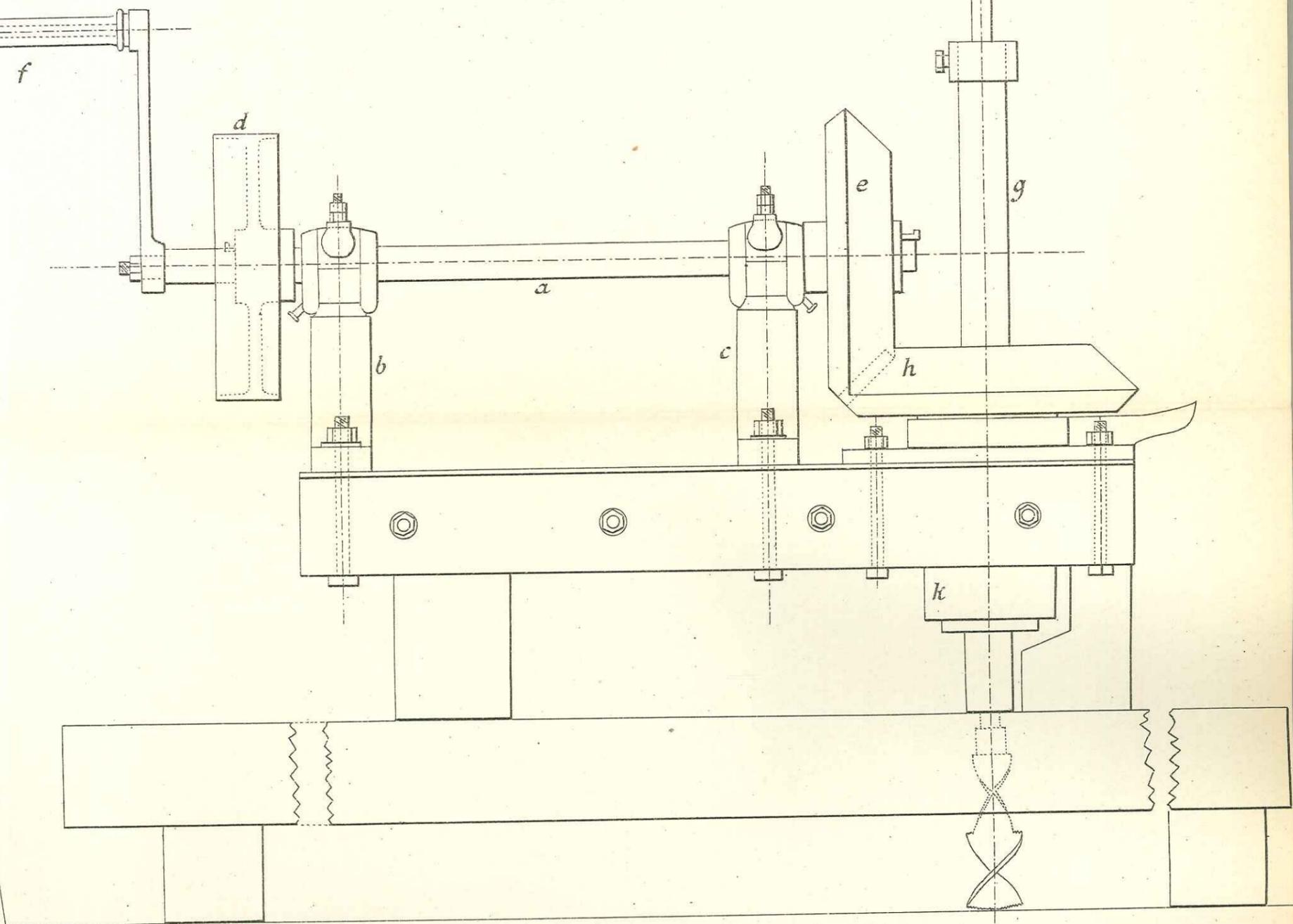


Fig. 17. — Coupe longitudinale de l'appareil rotatif à bras

Échelle $\frac{2}{15}$

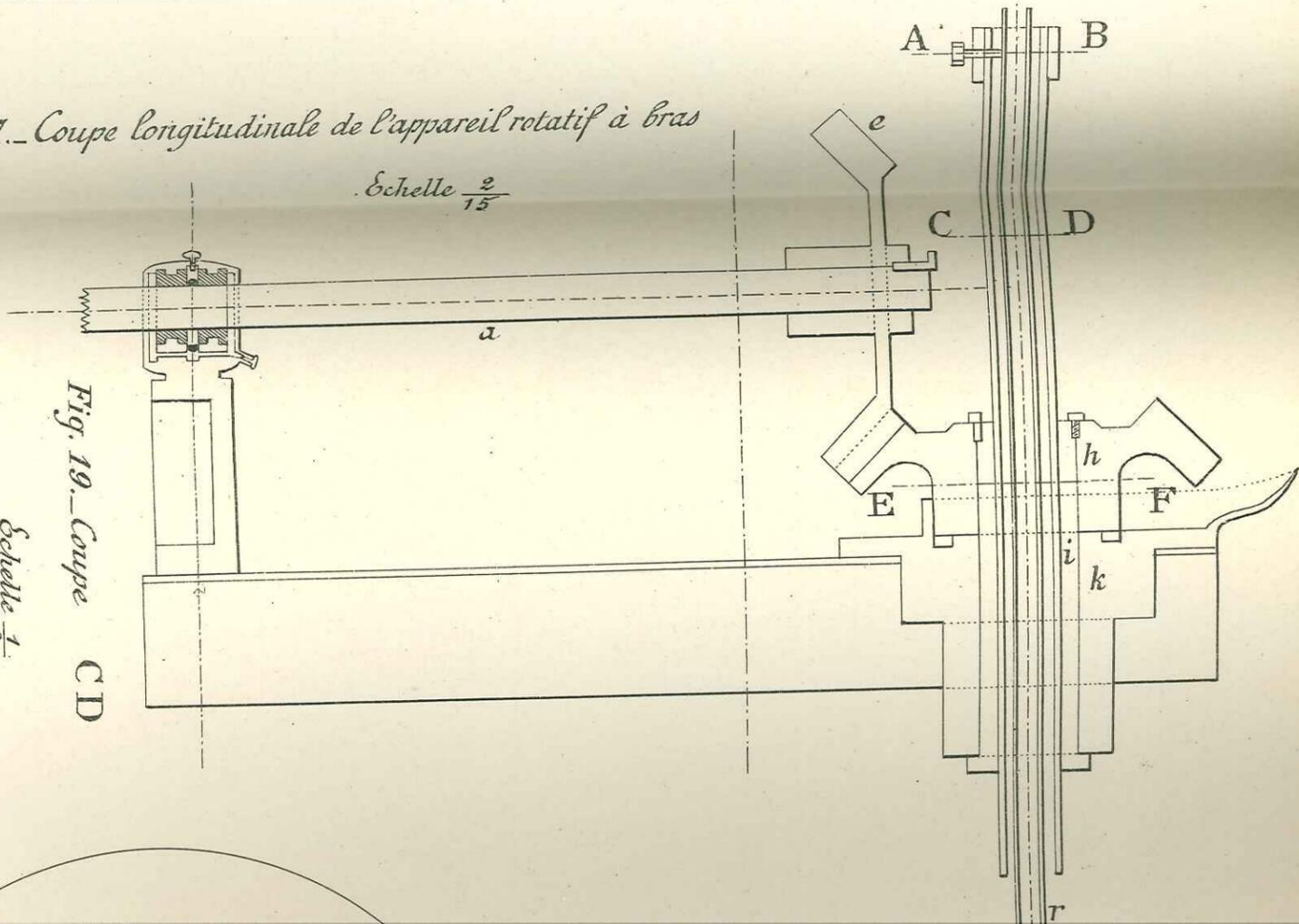
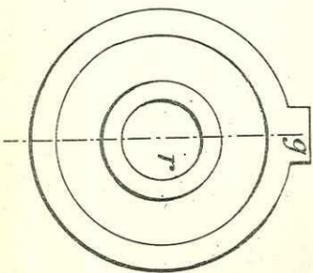


Fig. 19. — Coupe CD

Échelle $\frac{1}{2}$



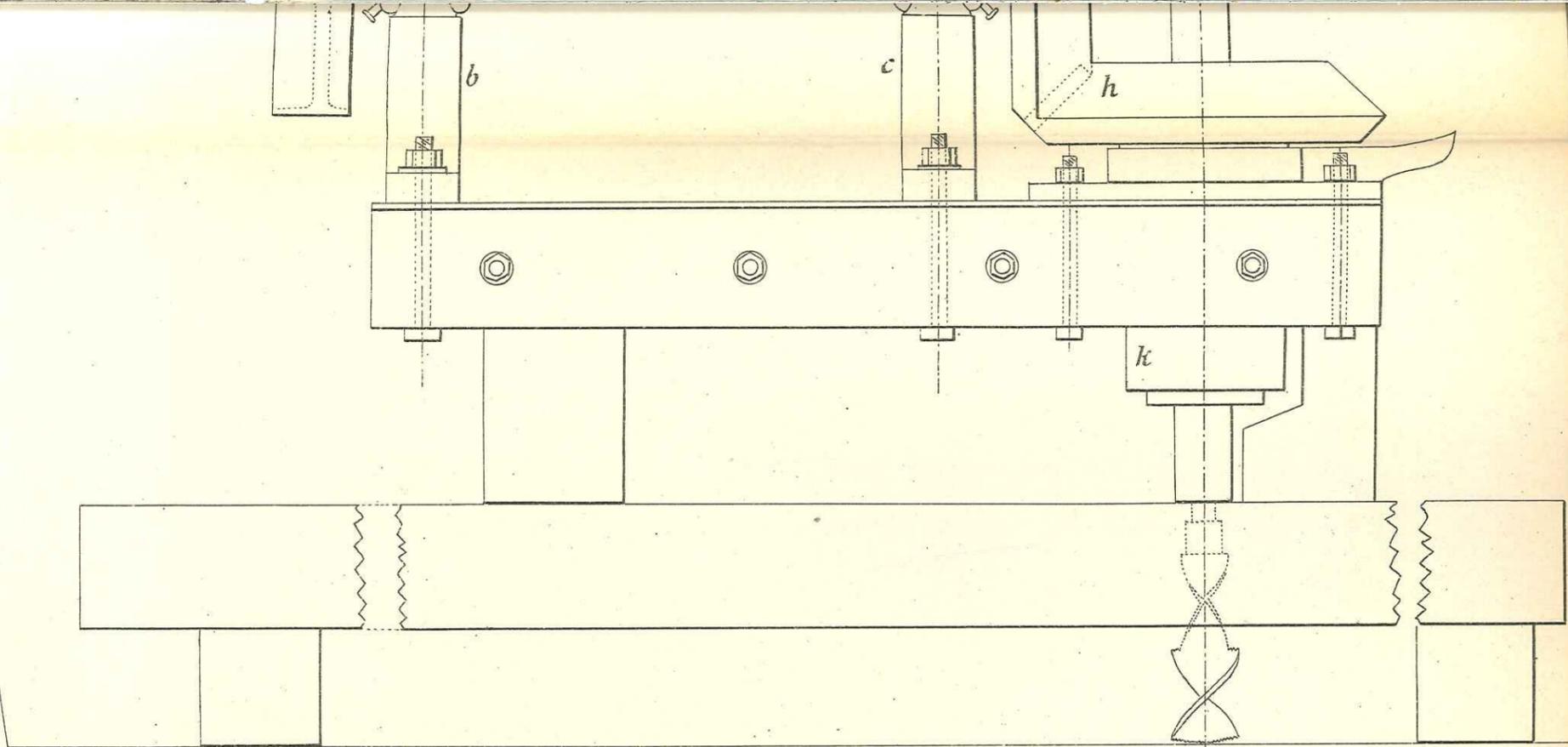


Fig. 17. - Coupe longitudinale de l'appareil rotatif à bras

Echelle $\frac{2}{15}$

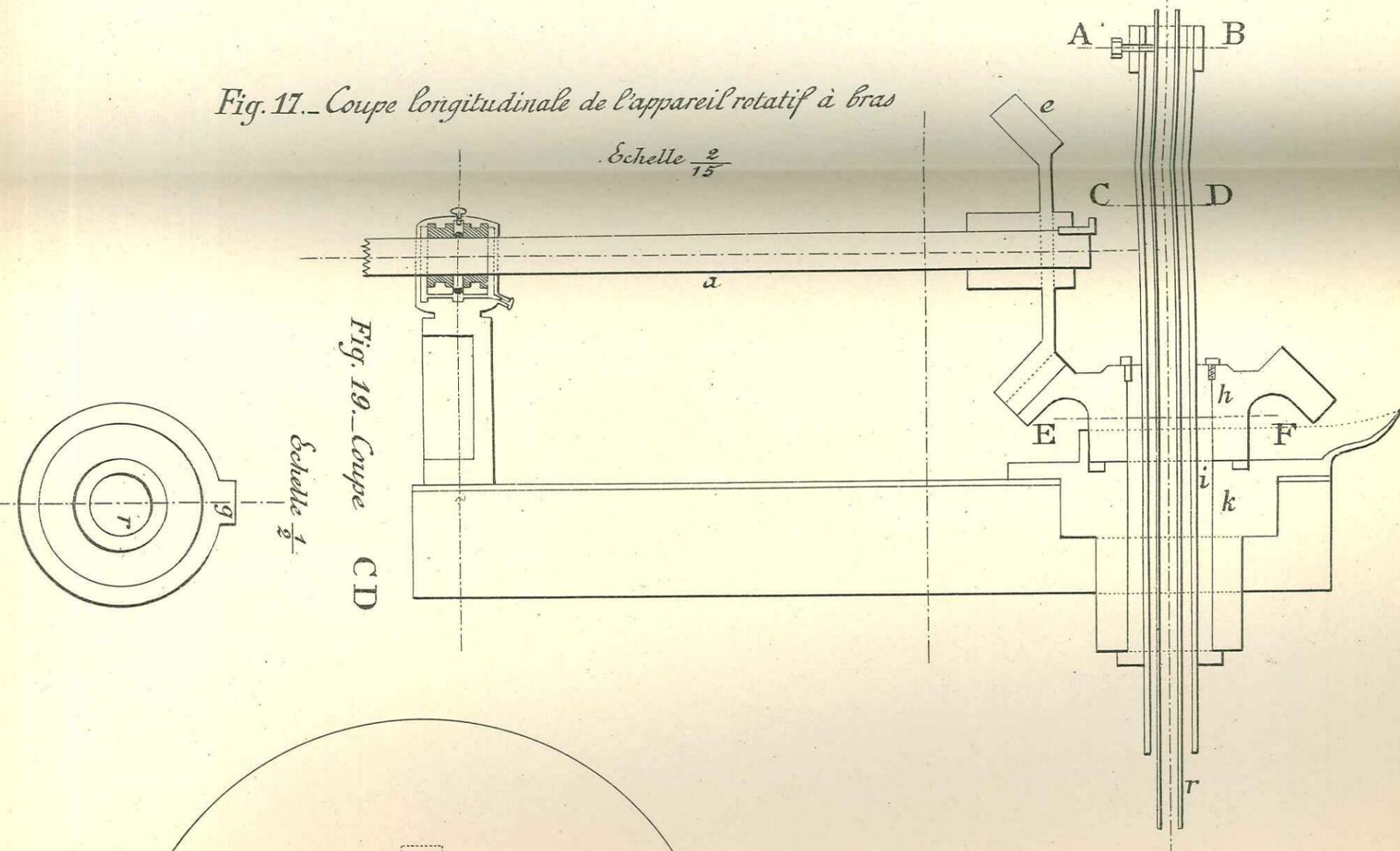
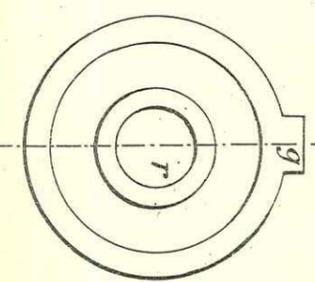


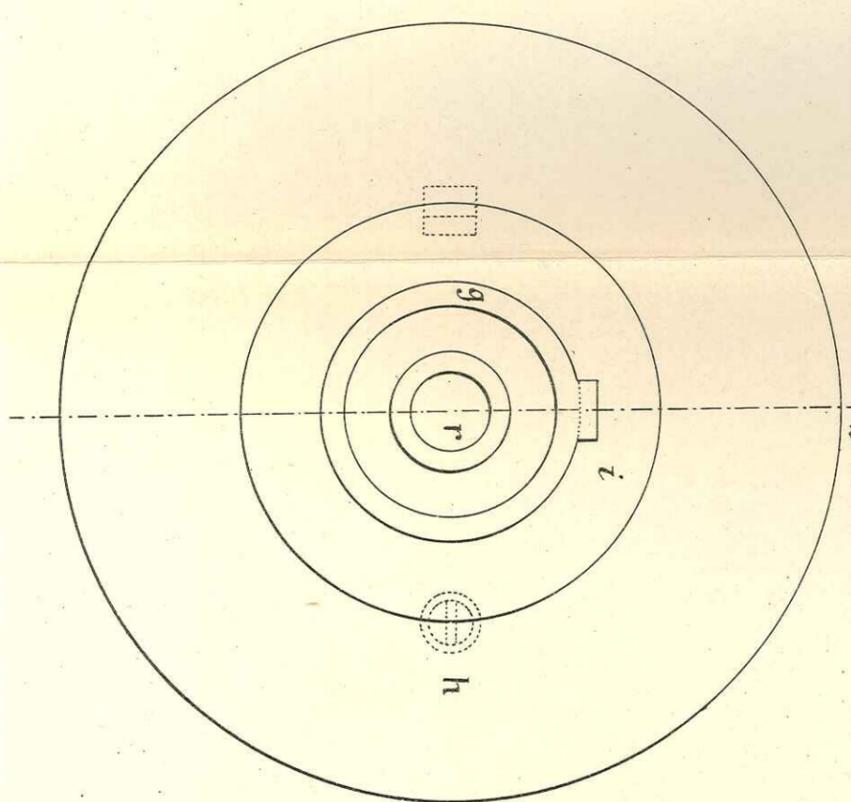
Fig. 18. - Coupe AB

Echelle $\frac{1}{2}$



Echelle $\frac{1}{2}$

Fig. 19. - Coupe CD



Echelle $\frac{1}{2}$

Fig. 20. - Coupe FF

Fig. 23 et 24.

Coupe et élévation latérale
montrant les détails de la suspension
tournante à billes et du bec-raccord en cuivre.

Echelle $\frac{1}{4}$

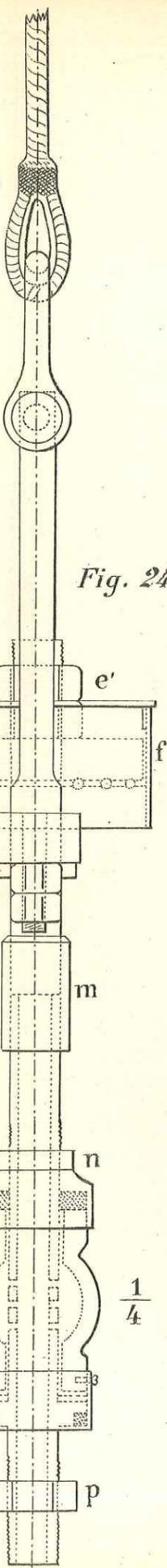
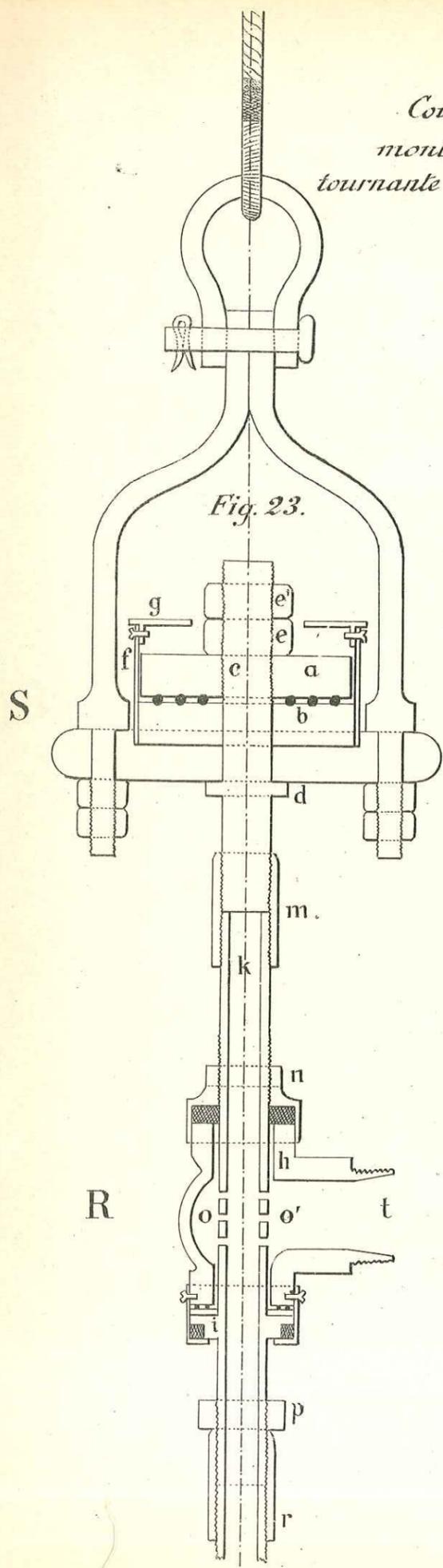


Fig. 25 et 26. - Éléval

Fig. 25.

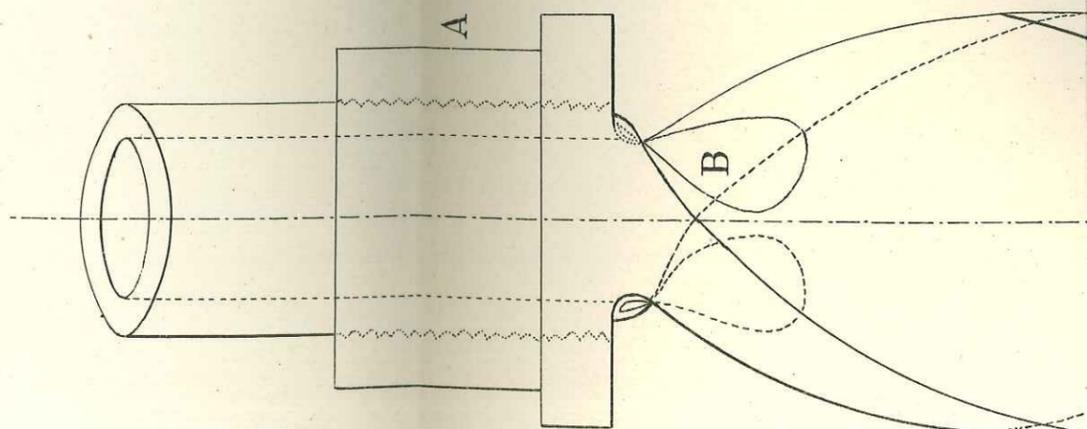
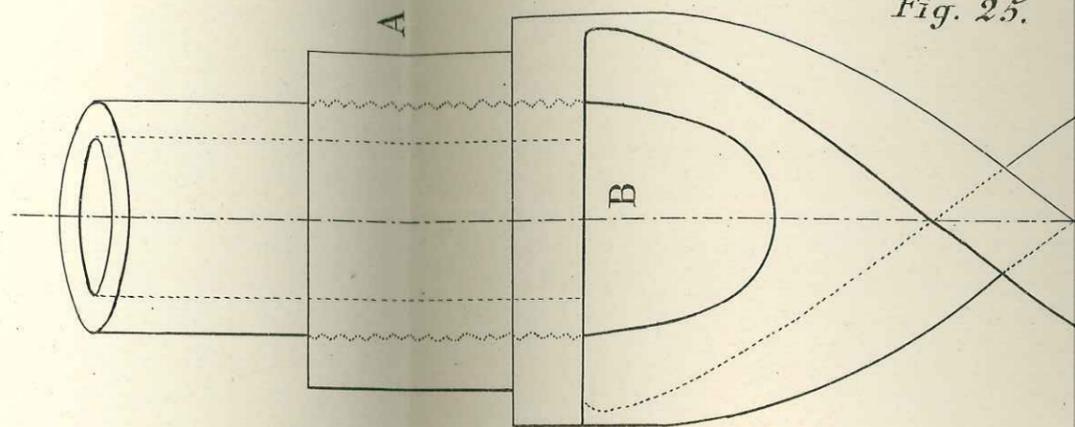


Fig. 25 et 26. — Élévation de la tarière rubanée à injection d'eau
grandeurs naturelle.

