

Dr. Ing. ALEXANDRE WASIUTYŃSKI
Professeur honoraire à l'École Polytechnique de Varsovie

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES DÉFORMATIONS ÉLASTIQUES ET LE TRAVAIL DE LA SUPERSTRUCTURE DES CHEMINS DE FER



Extrait des Annales de l'Académie des Sciences Techniques
à Varsovie tome IV (1937) p. 1.

ACADÉMIE DES SCIENCES TECHNIQUES À VARSOVIE, PALAIS STASZIC, RUE NOWY ŚWIAT 72.

PARIS



92, RUE BONAPARTE (VI)

IMPRIMÉ EN POLOGNE - 1937.

BIBLIOTEKA
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
Warszawa, ul. J. J. Jedynaka 10

B. 2163

DRUKARNIA SPOŁECZNA
WARSZAWA
PL. GRZYBOWSKI 3/5 TEL. 205-80

akr. 105/1, 53, 7

BZOGPK/01-24

S o m m a i r e

	Page
<i>I. Organisation des recherches. Méthode et moyens techniques</i>	1
1. Organisation des recherches	1
2. Méthode et étendue des observations	2
3. Le poste d'observation	2
4. Les appareils	8
a. La chambre obscure. p. 8. b. Le châssis et le déroulement de la pellicule. p. 10.	
c. Contrôle du temps. p. 11. d. Détour de l'image. p. 12. e. Marques des points observés. p. 12. f. Rôle de l'observateur. p. 14.	
5. Degré de précision des observations	14
a. Stabilité du fondement des appareils. p. 14. b. Mesurage sur pellicules des déformations observées. p. 16. c. La finesse des traits des épreuves. p. 17. d. Exactitude des mesurages sur pellicules. p. 17. e. Agrandissement des épreuves. p. 18. f. Rapport de la tension maximum à la tension observée. p. 18. g. Influence de la température. p. 19.	
<i>II. Coefficient de l'assise des traverses</i>	19
1. Importance de l'étude du coefficient de l'assise des traverses	19
2. Principes du calcul du coefficient de l'appui du rail et du coefficient de l'assise des traverses d'après les observations sous charges roulantes	20
3. Calcul de la valeur moyenne du coefficient D	22
4. Compression des traverses	31
5. Le coefficient de l'appui des traverses et le coefficient de leur assise	32
6. Les coefficients de la route et du ballast	34
7. Coefficient de l'assise des traverses d'après les observations de l'abaissement des traverses sous presses hydrauliques	37
8. Enfoncement du sol sous la pression d'une plaque rigide	42
9. Enfoncement du sol sous pression de plusieurs plaques rigides	44
10. Enfoncement du sol soumis à la pression d'une plaque ronde d'après la théorie de l'élasticité	45
11. Coefficient moyen de l'assise des traverses sous la charge de une à cinq traverses	48
Conclusions	50
<i>III. Déformations verticales du rail</i>	50
1. Étendue des observations et bases théoriques d'appréciation de leurs résultats	50
2. Abaissement du rail selon la vitesse et selon d'autres causes	54
a. Mesurages effectués. p. 54. b. Influence de la vitesse des trains. p. 54. c. Influence des causes autres que la vitesse. p. 55.	
3. Influence de la construction des locomotives	76
a. Pression de la vapeur sur les roues motrices. p. 76. b. Pression de la crosse du piston sur les glissières. p. 77. c. Vibration des ressorts. p. 77. d. Variations de la charge des roues par suite des vibrations des ressorts. p. 78. e. Le surplus de contrepoids. p. 79. f. Masses en mouvement rectiligne alternatif. p. 83. g. Vibrations libres de la roue par suite des variations de sa pression. p. 83. h. Influence des dénivellations de la surface de roulement du rail et de l'usure locale des bandages sur la pression de roue. p. 84. i. Amplitude maximum des vibrations des ressorts. p. 86. k. Vibrations libres du rail. p. 86.	

	Page
4. Retard des déformations verticales	87
Conclusions	88
<i>IV. Le travail du rail</i>	<i>90</i>
1. Établissement des déplacements synchrones horizontaux et verticaux sur les épreuves	90
2. Bases théoriques d'appréciation	94
3. Etendue des observations	94
4. Valeur des tensions suivant la vitesse	100
5. Le travail du rail comparé à son abaissement	100
Conclusions	112
<i>V. Mouvements longitudinaux du rail</i>	<i>112</i>
1. Causes du phénomène	112
2. Observation des déplacements longitudinaux du rail sous pression de presses hydrauliques	113
3. Calcul du coefficient de l'appui axial des rails	118
a. Rail sur appuis élastiques. p. 118. b. Rail lié à son assise. p. 121.	
4. Réaction d'une voie sollicitée par des efforts axiaux	122
5. Ligne d'influence des déplacements d'un rail sous l'action d'une seule force axiale	124
a. Rail infiniment long. p. 124. b. Rail sur 22 appuis. p. 125.	
6. Diagramme des déplacements d'après les forces tangentielles	126
7. Diagramme des forces tangentielles et de l'effort de traction moyen d'après les déplacements	129
8. Comparaison des résultats	133
9. Tensions que produisent les forces axiales	133
Conclusions	135
Résumé	135
Errata	136

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES DÉFORMATIONS ÉLASTIQUES ET LE TRAVAIL DE LA SUPERSTRUCTURE DES CHEMINS DE FER.

Par M. Alexandre Wasiutyński.

I. Organisation des recherches. Méthode et moyens techniques.

1. Organisation des recherches.

La théorie des déformations élastiques et du travail de la superstructure des chemins de fer sous l'action des forces verticales à l'état statique, fut étudiée à fond dans les travaux de Winkler, Schwedler, Zimmermann, Chołodecki, Skibiński, Karasiński, Huber et autres.

La solution théorique des problèmes beaucoup plus difficiles concernant les déformations et le travail de la superstructure sous l'action des forces verticales dynamiques, a fait l'objet d'études approfondies de Pétrof et de Flamache, plus tard de celles de Saller et de Timoshenko.

Néanmoins, tous ceux, qui ont étudié ce sujet, n'ont pas cessé de se plaindre du manque de données expérimentales à l'appui de leurs conclusions théoriques.

En ce qui concerne les déformations et le travail de la superstructure sous l'action des forces transversales et longitudinales ainsi que des efforts de torsion, les manques de théorie et d'observations se font sentir encore plus fortement. On a supposé généralement, que les efforts verticaux sont de beaucoup les plus prononcés, et que, par conséquent, les autres efforts peuvent n'être pas pris en considération.

Comme on le voit, les plus grandes incertitudes dans l'appréciation du travail de la superstructure doivent être attribuées au manque d'observations précises des phénomènes extrêmement complexes, qui ont lieu dans différentes parties de la superstructure sous l'action des trains en mouvement. Cet état d'incertitude et la divergence d'opinions concernant les conditions de stabilité et de résistance de la superstructure qui en résulte, apparaissent clairement dans les conclusions du Congrès International des chemins de fer, session du Caire 1933, qui, à la suite des délibérations sur la question de „Relations entre le véhicule et la voie en vue de sauvegarder la sécurité aux vitesses élevées. Résistance de la superstructure”, a émis en premier lieu, le vote suivant:

„L'évaluation de la résistance de la voie ferrée est surtout d'ordre pratique. Toutefois, on doit encourager et suivre avec intérêt les recherches expérimentales entreprises sur certains réseaux”.

Cependant, les besoins de l'exploitation des chemins de fer exigent une appréciation plus ou moins exacte de la résistance et de la stabilité de la voie au passage à différente vitesse des trains conduits par différents types de locomotives. Ce problème se posant aux chemins de fer de l'Etat polonais à l'occasion de la construction de nouveaux types de locomotives à grande vitesse pour trains lourds de voyageurs, le soussigné a cru

qu'il serait utile d'organiser des observations de l'influence exercée par ces locomotives sur le travail de la superstructure dans les nouvelles conditions de charge et de vitesse, à l'instar des observations qui ont eu lieu autrefois au chemin de fer Varsovie-Vienne. Cette opinion ayant gagné l'appui du Conseil Technique du Ministère des Communications Polonais, un poste d'observation fut construit en 1932 entre les gares de Varsovie et de Pruszków à proximité du poste de block Włochy de la ligne Varsovie — Skierniewice.

La saison des travaux de 1932 n'a pu être utilisée que pour certaines opérations préparatoires concernant l'appareillage du poste. Ce ne sont que les saisons d'été de 1933 et 1934 qui furent employées à l'observation de la superstructure. Le soussigné, qui fut chargé de diriger les observations, a profité pour la plupart du temps de l'aide de MM. les ingénieurs Stanislas Zelent et Bogdan Lubiński, et, temporairement, d'autres encore de ses anciens et de ses présents élèves de l'Ecole Polytechnique de Varsovie. Spécialement, M. Lubiński a exécuté les calculs, tableaux et diagrammes concernant les coefficients de l'assise des traverses ainsi que les déformations longitudinales des rails, et M. Zelent ceux qui se rapportent aux abaissements des rails et leur fatigue.

2. Méthode et étendue des observations.

La méthode photographique appliquée en 1897 et 1898 à observer les déformations de la superstructure au chemin de fer de Varsovie-Vienne¹⁾ exige la construction près de la voie observée des fondations convenablement isolées des vibrations du sol avoisinant. C'est indubitablement le mauvais côté de la méthode qui oblige de limiter les observations à un petit tronçon de voie, et, par suite, à une construction de voie qui s'y trouve. D'un autre côté, la méthode photographique possède la qualité inappréciable d'exclure les erreurs provenant de l'inertie et du jeu perdu de différentes parties: récepteurs, transmetteurs et enregistreurs des appareils servant aux observations, et, par conséquent, elle est plus apte à donner une image vraie des phénomènes.

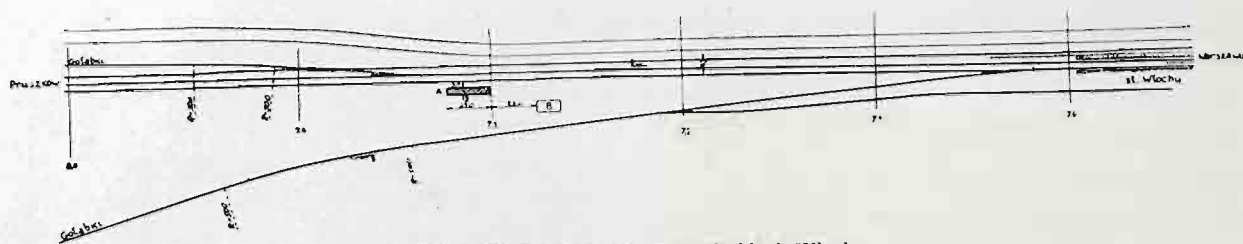
Les effets dynamiques de l'action des véhicules sur la voie laissent tant d'incertitudes, qu'on est conduit à éclaircir tout d'abord les phénomènes les plus importants. L'action qu'exercent sur un certain type de superstructure différents types de véhicules se mouvant à différente vitesse, présente à elle seule un sujet suffisamment riche d'études et de conclusions qu'on pourrait en tirer, non seulement quant à la stabilité et la résistance de la superstructure, mais aussi quant aux qualités que présentent sous ce rapport les véhicules mêmes, ce que justement on avait en vue en organisant les observations.

Dans cet ordre d'idées on a limité l'étude proposée à l'observation des déformations en ligne droite en appliquant la méthode photographique avec des appareils plus complets et plus perfectionnés que ceux employés ultérieurement et en élargissant de cette manière l'étendue des recherches.

3. Le poste d'observation.

L'endroit pour conduire les recherches fut choisi au km 7.3 de la ligne mentionnée ci-dessus, voie n° 2 des trains allant à Varsovie. Le tronçon de voie observé est situé en ligne droite en pente très faible de 0,07% vers Pruszków (fig. 1). Le ballast repose directement sur terrain sablonneux naturel, dont on voit la coupe jusqu'à une profondeur de 10 m sur fig 5. La voie est posée en rails du type normal polonais S de 42.5 kg/m (fig. 2). La longueur de rail est de 15 m sur 22 traverses en pin injecté (fig. 3). Le ballast est en pierre concassée d'épaisseur de couche de 52 cm (fig. 4). La nature des rails, des traverses et du ballast est indiquée dans les tableaux I, II et III.

¹⁾ Notes sur les déformations momentanées de la voie d'après les observations faites en 1897 et 1898 au chemin de fer de Varsovie-Vienne par Alexandre Wasiutyński — Bulletin de la Commission Internationale du Congrès des chemins de fer, 1898 p. 1437 et 1900 p. 2667.



A. Poste d'observation. B. Poste de block Wlochy.

Fig. 1. Emplacement du poste d'observation.

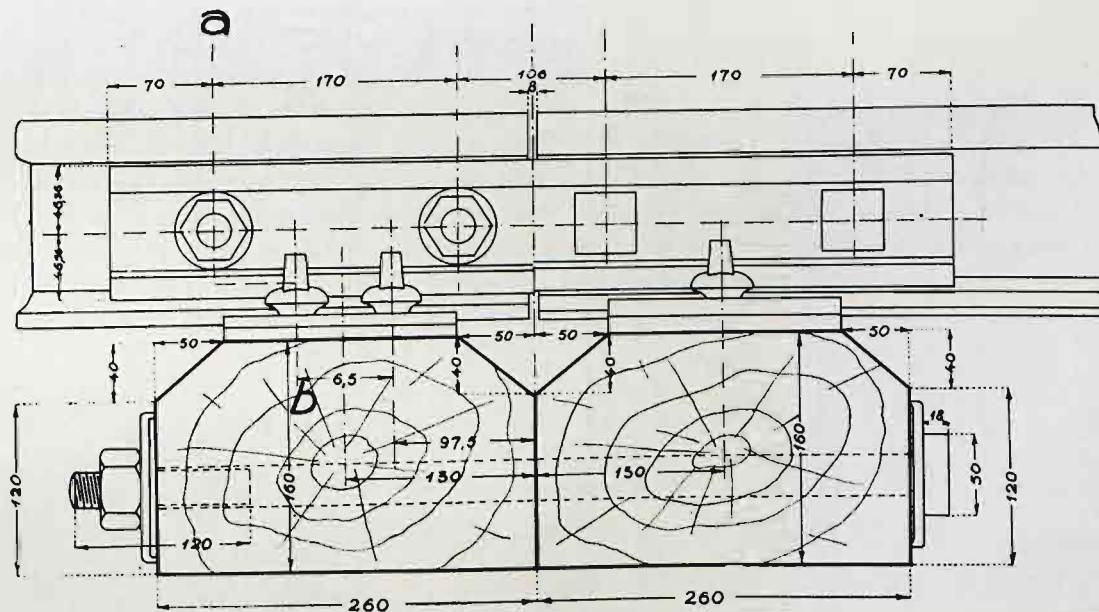
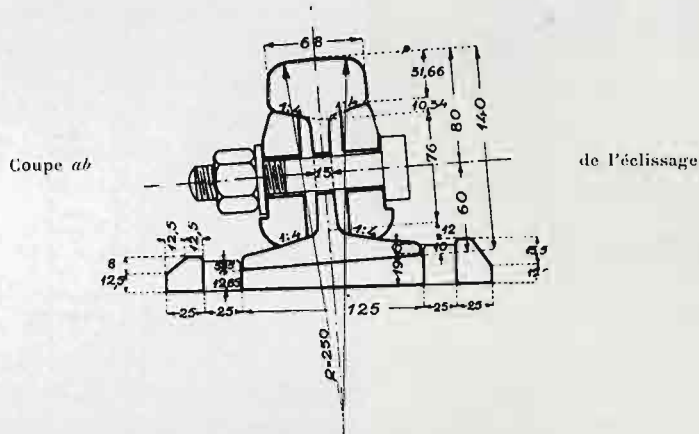


Fig. 2. Joint des rails type S de 42,5 kg par m.

On a choisi comme sujet d'études un tronçon de voie composé d'une paire de rails avec joints avoisinants, ce qui exigeait la possibilité de changer l'emplacement des appareils sur une longueur d'à peu près 16 m.

L'arrangement optique des appareils, vu l'échelle exigée des épreuves, ne permettait pas de reculer leurs objectifs plus loin que de 3,5 m du rail observé. Pour garantir les appareils autant que possible des tremblements produits par le passage des trains à une si petite distance, on a fondé les appareils sur 8 pieux en bois de 10 m de longueur.

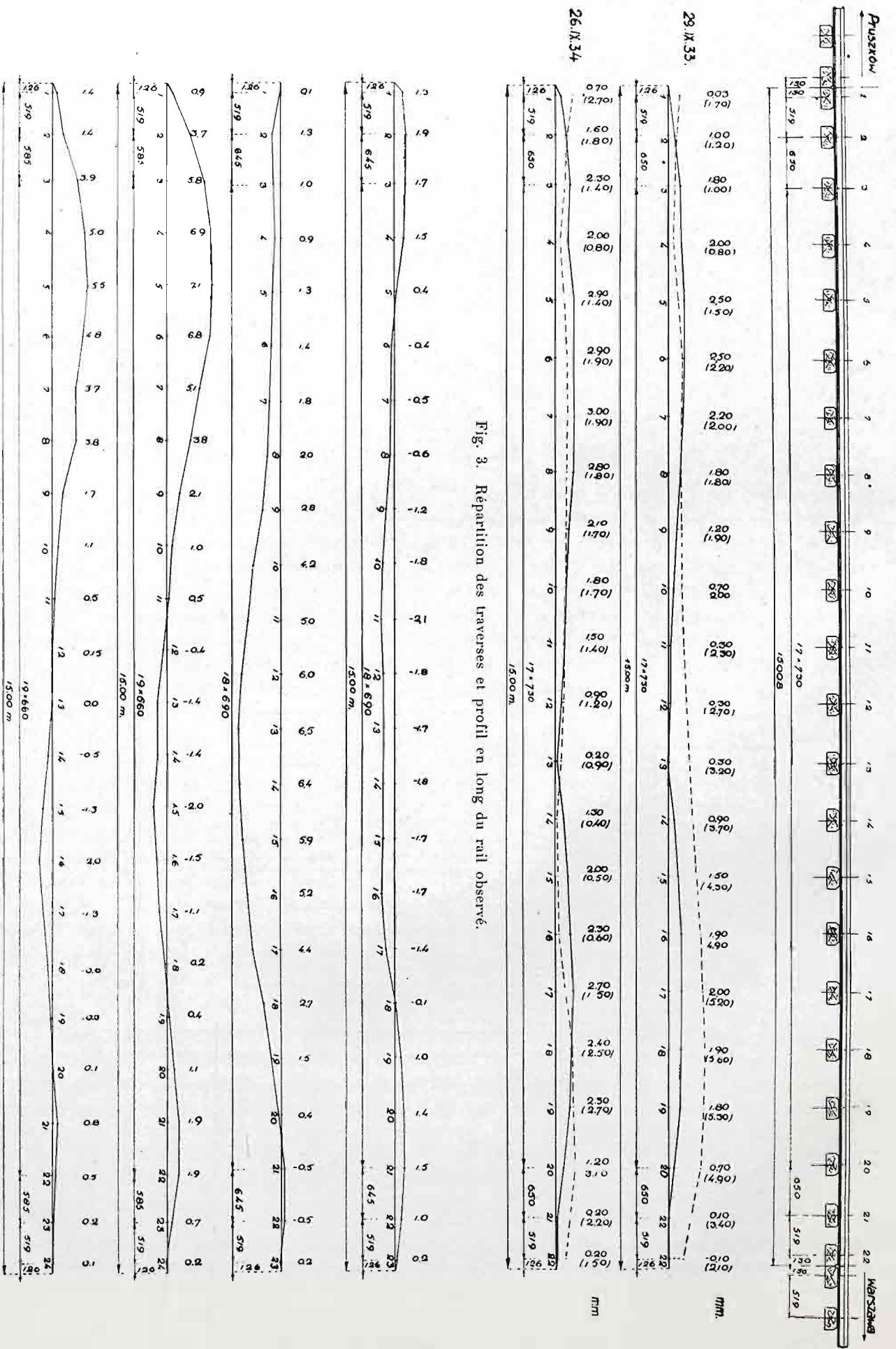


Fig. 3 a. Profils en long des rails avoisinant le rail observé.

enfoncés dans des puits circulaires en béton d'une profondeur de 5 m au-dessous du niveau du sol. La tête des pieux fut enfoncée de 0.5 m dans une plaque en béton armé de 0.75 m d'épaisseur, ayant 17 m \times 2.1 m de dimension en plan. Sur cette plaque furent posées en long deux poutres en fer *D*, *D* solidement fixées (fig. 6), sur lesquelles glissaient parallèlement à la voie des poutrelles transversales *C* servant de bases aux appareils.

Les appareils photographiques *A*, entièrement en métal de même que leurs bases, furent vissés à fond aux bases des appareils après leur ajustement, ainsi que les bases des appareils aux poutres longitudinales. Comme on le voit d'après le dessin, les vis calantes des appareils sur leurs bases sont disposées près des points d'appui des bases sur les poutres longitudinales du fondement. Quoique de cette manière la stabilité des appareils fut suffisamment garantie, on mettait entre les poutrelles de base et les poutres longitudinales du fondement, avant de les visser ensemble, des feuilles de rubéroïde pour éviter les moindres vibrations libres des poutrelles de base.

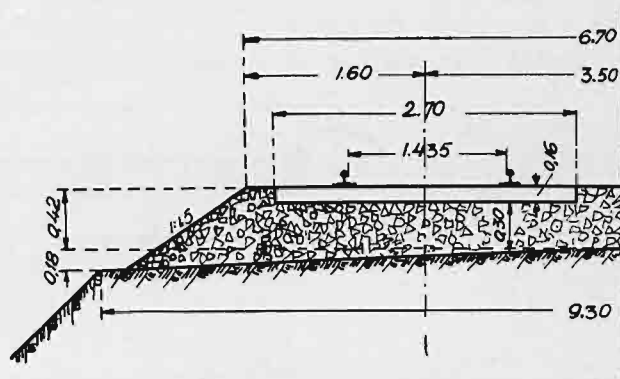
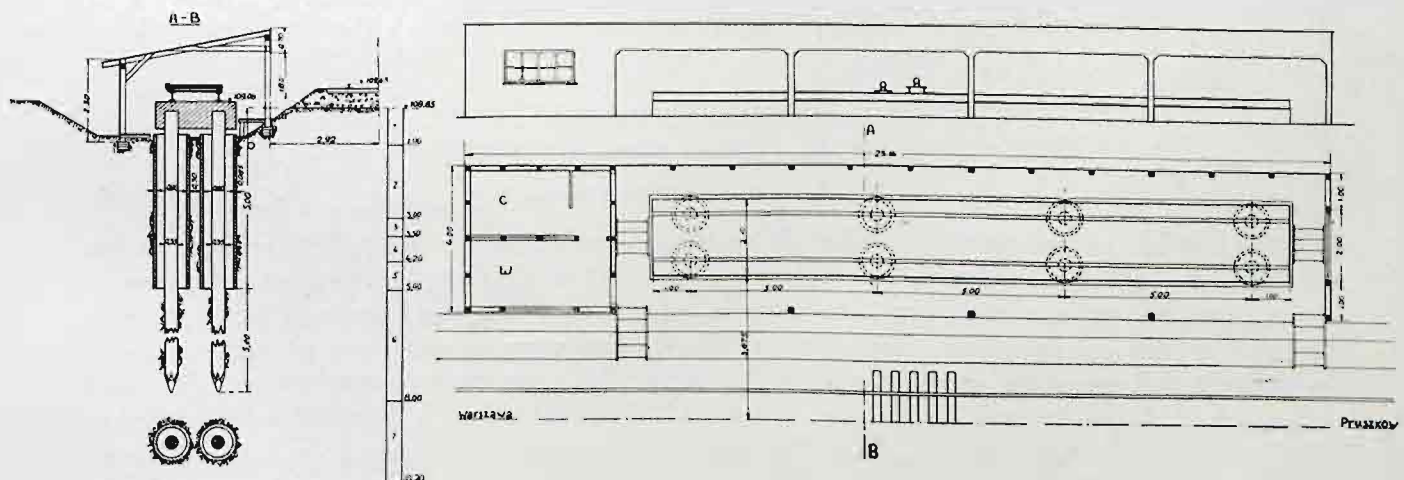


Fig. 4. Demi-profil transversal de la voie.

En appliquant dans la fondation des appareils, des pieux en bois au lieu de pieux plus durables en béton armé, on a eu en vue d'atténuer au minimum l'influence des vibrations libres du fondement. Dans le même but on a donné à la plaque en béton armé des dimensions et un poids (environ 60 tonnes), avec lesquelles son inertie était très considérable.

Le fondement des appareils fut protégé par un abri ouvert du côté de la voie observée. On a aménagé près de cet abri de petits compartiments destinés à servir de laboratoire photographique et d'atelier de serrurerie.

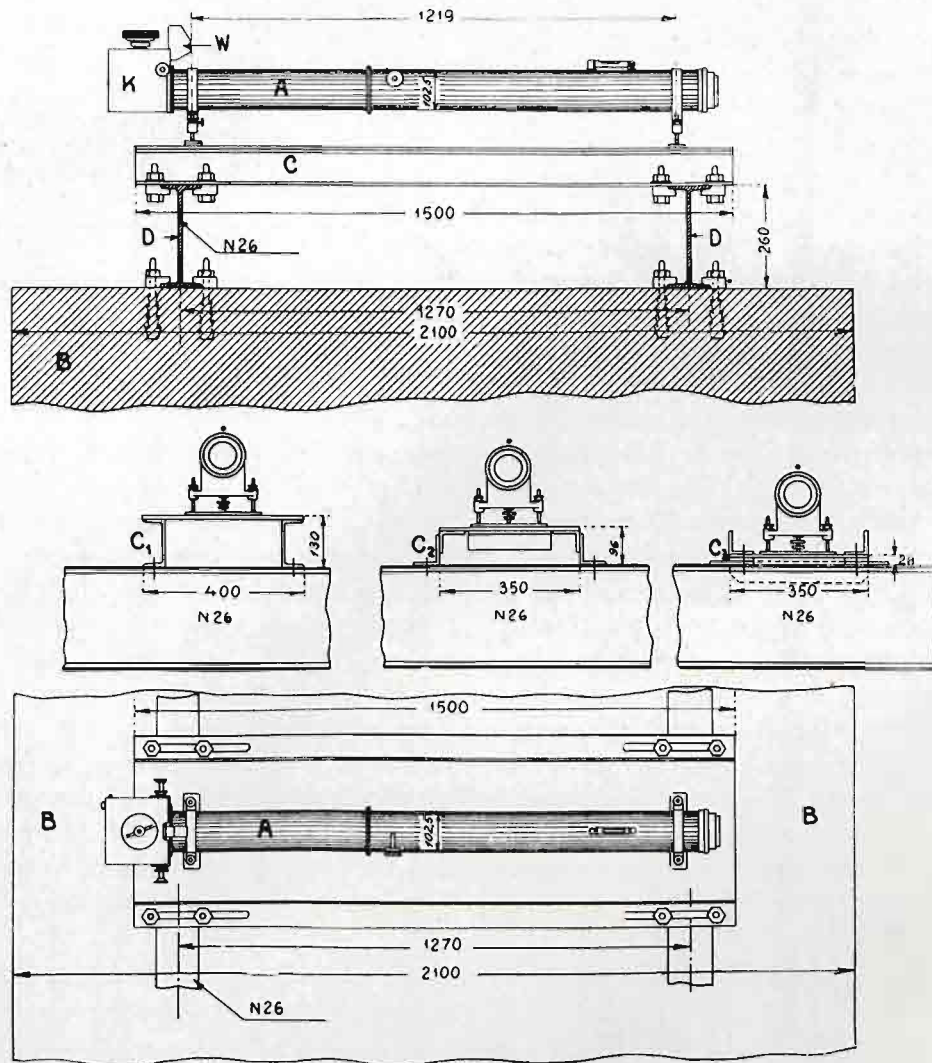
L'état du rail et de ses assises, qui ont servi d'objets d'observation, fut soigneusement examiné. Il était important de constater non seulement le manque de défauts superficiels du rail, mais aussi qu'il fut droit. Des rails nouveaux, du nombre desquels on a dû faire le choix, furent librement posés sur les traverses de la voie existante et leur surface de roulement fut nivelée avec un niveau à lunette et réflecteur de haute précision en employant une mire qui permettait la lecture des dixièmes de millimètres. Avec ces instruments on a pu se convaincre, que la table de roulement de chacun de ces rails s'écartait



Coupe *AB*. Sondage. Elévation du côté de la voie et plan. *C* Laboratoire photographique. *B* Atelier.
Sondage: 1—Terrain argileux. 2—Sable fin. 3, 4—Sable fin imprégné d'eau. 5—Argile. 6, 7—Sable.

Fig. 5. Disposition d'ensemble du poste d'observation.

en profil longitudinal de quelques millimètres de la ligne droite. Le rail, qui s'écartait le moins de la ligne droite, fut posé à l'endroit où il devait être soumis à l'observation et, après passage de quelques trains et vérification du bourrage des traverses, son nivellement fut répété. Puisqu'on on s'est convaincu que les écarts de ce rail de la ligne droite sont restés à peu près les mêmes, on a nivelé un plus grand nombre de rails de la même voie des deux côtés du poste d'observation, ayant en vue de choisir un rail plus convenable; cependant, on n'a pas pu atteindre le résultat désiré.



C₁ C₂ C₃ appareil sur bases de différente hauteur.

Fig. 6. Appareil sur fondement.

Les fig. 5 et 3a montrent les profils en long caractéristiques des rails nivelés, ainsi que le profil du rail choisi d'après le nivellement de 1933 et de l'année suivante. Au courant de ces années on a répété plusieurs fois le nivellement du rail observé, pour se convaincre si des changements dans leur profil en longueur ne sont pas survenus. Avant la période d'observation de 1934 on avait changé le ballast de grosse pierre de granit concassé en menue pierre de basalte concassé. On s'attendait à l'occasion qu'un bourrage soigné des traverses avec un ballast choisi permettrait d'amener le rail à une forme plus droite. L'expérience de deux années a démontré que pendant cette période les traits caractéristiques du profil en long du rail sont restés les mêmes, tandis que les écartements de la table de roulement du rail de la ligne droite sont devenus un peu plus grands.

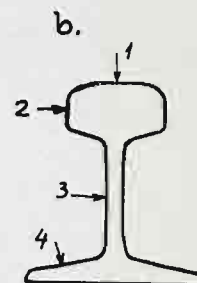
TABEAU I.

Laboratoire Mécanique
du Ministère des Communications

24 août 1933

Résultats des essais de dureté du métal du rail observé.

Indication du point d'essai		Diamètre de l'enfoncement		Dureté en degrés de Brinell
sur fig. a	sur fig. b	dans le rail	dans la barre d'essai	
I	1	3,0	3,2	229
	2	2,7	2,9	232
	3	2,9	2,9	201
	4	2,9	3,0	215
II	1	3,1	3,5	258
	2	2,8	2,9	215
	3	2,9	3,0	215
	4	3,1	3,1	201
III	1	3,1	3,8	307
	2	2,8	3,0	232
	3	2,8	3,0	232
	4	3,0	3,0	201



Exécuté par Dąbrowski.

TABEAU II.

Laboratoire de Résistance des Matériaux
de la Politechnique de Varsovie

8 août 1932

Essais du bois des traverses.

1. Essais physiques.	
A. Nombre de couches sur 10 mm de rayon	3 — 9
B. Poids en grammes d'un cm ³ de bois séché jusqu'au poids constant dans une température de 60° — 70° C.	0,565
C. Humidité du bois	12,6%
2. Essais de résistance en état d'humidité de 12,6%	
D. Résistance à la compression:	kg/cm ²
a. dans la direction de l'axe du tronc: . . . échantillon n° 1	463
„ n° 2	490
b. dans la direction radiale: „ n° 3	53
c. dans la direction tangentielle aux couches: „ n° 4	60
d. dans la direction perpendiculaire à la face supérieure de la traverse: „ n° 5	37
e. dans la direction perpendiculaire à la face latérale de la traverse: „ n° 6	30
E. Coefficient de l'élasticité par compression dans la direction de l'axe du tronc . . .	118000
F. Coefficient de l'élasticité par compression perpendiculairement à la face supérieure de la traverse	2065

Signé L. Karasiński.

T A B L E A U III.

Essais des pierres.

1. Granit concassé.

Laboratoire de Résistance des Matériaux
de l'Ecole Polytechnique de Varsovie

8 août 1932

1. Essais de résistance	Kg par cm ²
Résistance à la compression en état sec:	
échantillon n° 1	2129
n° 2	1867
n° 3	1698
n° 4	2366
n° 5	1348
n° 6	2502
2. Essai dans le tambour de Deval	
Râpage réciproque	5,07%

Signé *L. Karasiński*

2. Basalte concassé.
de Janowa Dolina.

Institut de Recherches de la Route
à l'Ecole Polytechnique de Varsovie

4 mai 1936

1. Essais de résistance	Kg par cm ²
Résistance à la compression suivant la profondeur de provenance	de 2535 à 3648
2. Essais dans le tambour de Deval	
Râpage réciproque suivant la profondeur de provenance	de 1,42% à 2,65%

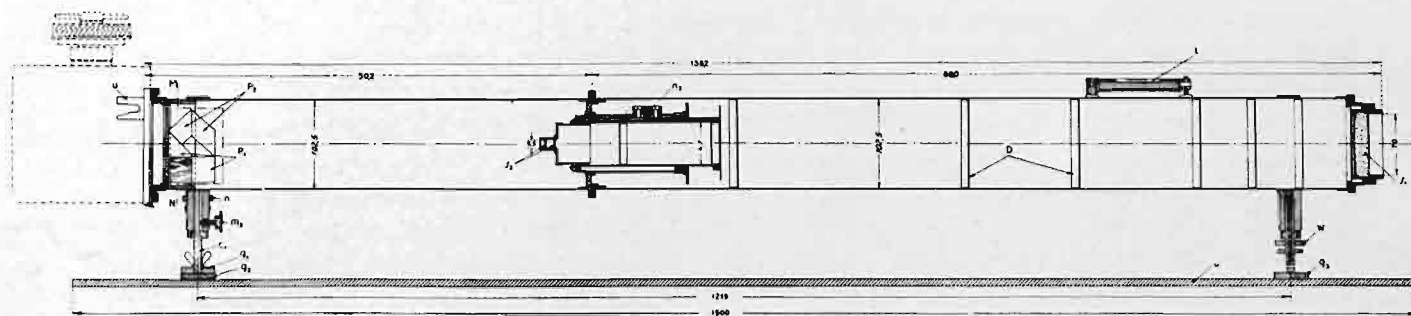
Signé *M. Nestorowicz*

L'état des traverses neuves destinées à être posées au poste d'observation en 1932 fut examiné en tâchant que leurs dimensions soient uniformes. Les différences peu sensibles dans la largeur de leur assise sont indiquées dans les tableaux V et VI.

4. Les appareils.

a. La chambre obscure.

Chacun des deux appareils photographiques (fig. 7) que possède le poste d'observation, se compose d'une chambre obscure en forme de lunette en laiton de 1,382 m de longueur, ayant intérieurement 10,25 cm de diamètre, montée sur trois vis calantes, et d'un châssis d'aluminium dur (fig. 8 a, b, c) pour pellicules, fixé dans la monture de derrière de la lunette. La partie d'avant de la lunette, du côté de la voie observée, est munie d'un objectif apocromatique de Steinheil, de type astronomique, à distance focale $f=60$ cm.



Coupe en long

f_1 — objectif
 f_2 — oculaire

D — diaphragmes
 P_1, P_2 — prismes

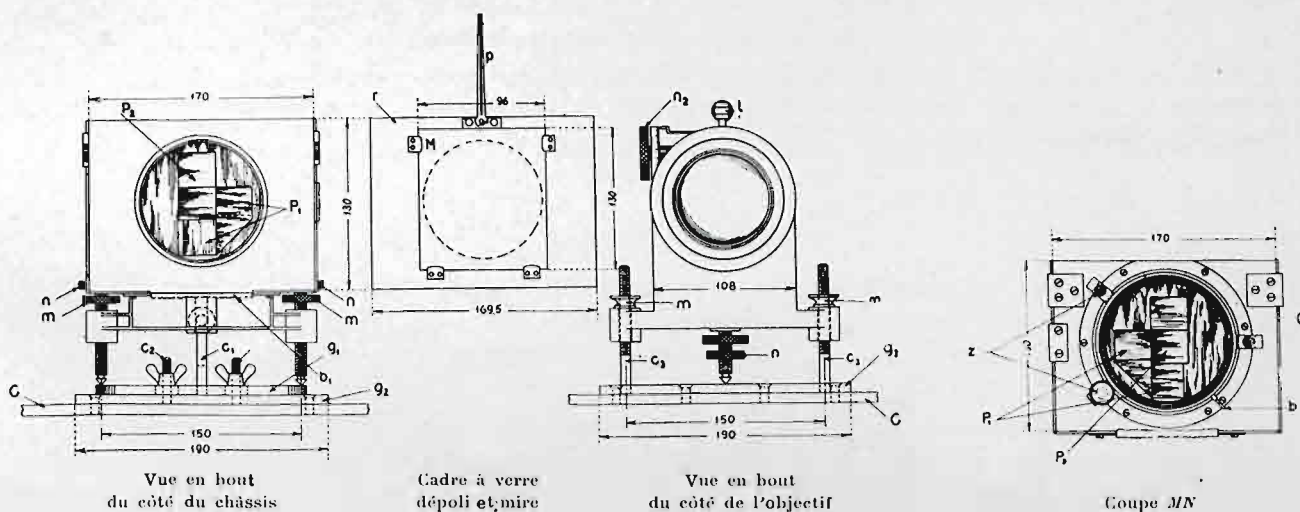


Fig. 7. Appareil photographique. Lunette servant de chambre noire.

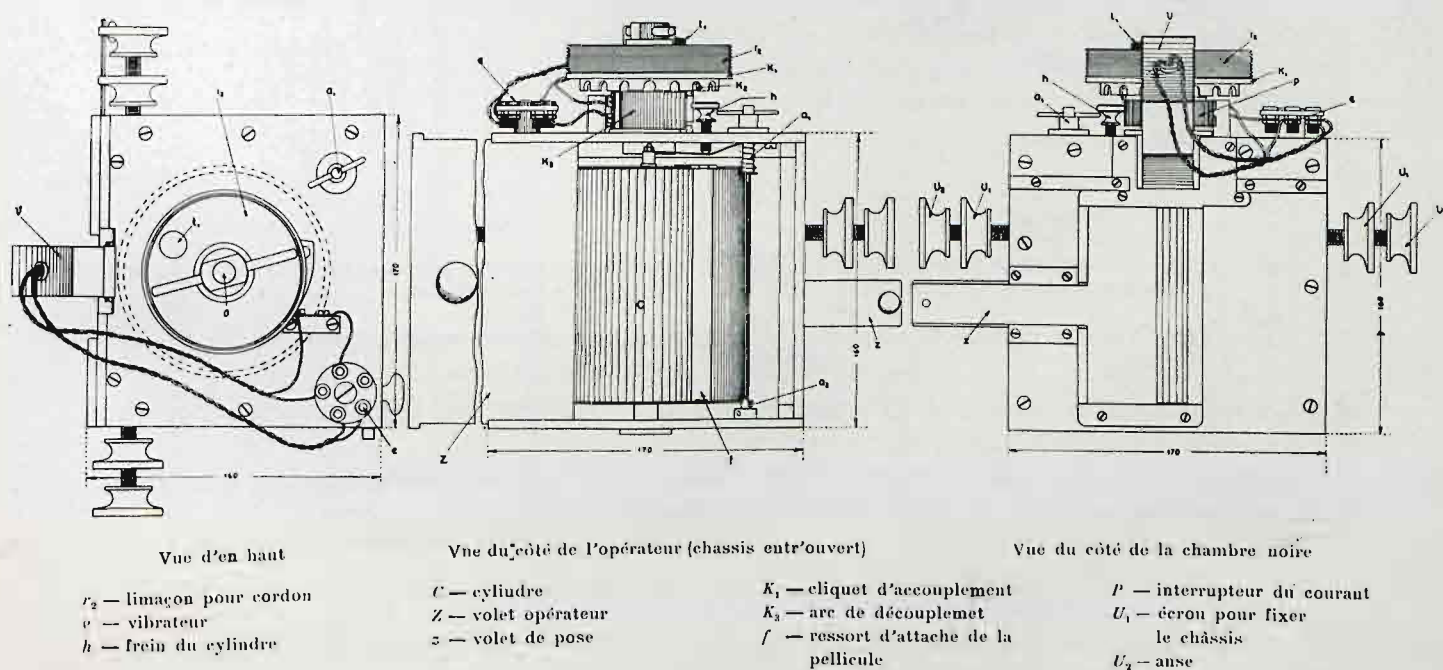
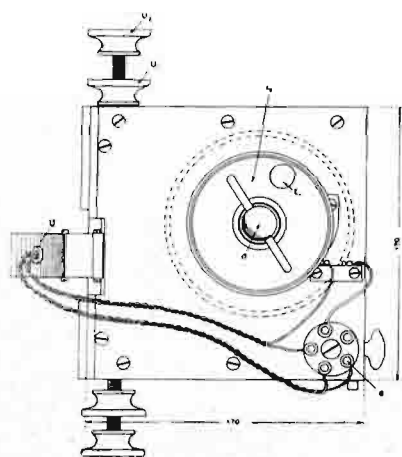
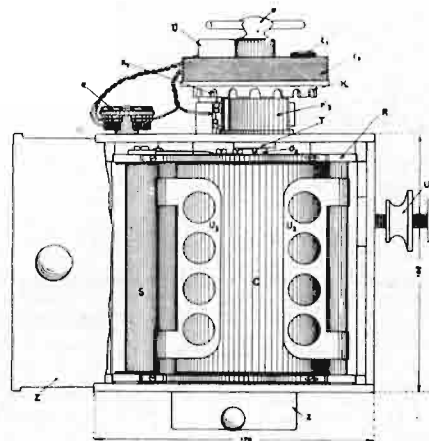


Fig. 8a. Châssis n° 1 de l'appareil photographique.



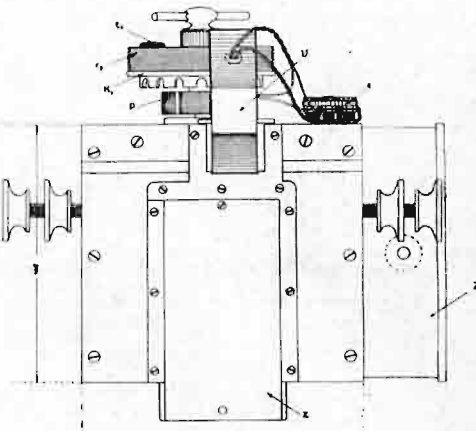
Vue d'en haut

r_2 — limaçon pour cordon
 v_1 — vibreur
 z_2 — volet opérateur
 z_1 — volet de pose



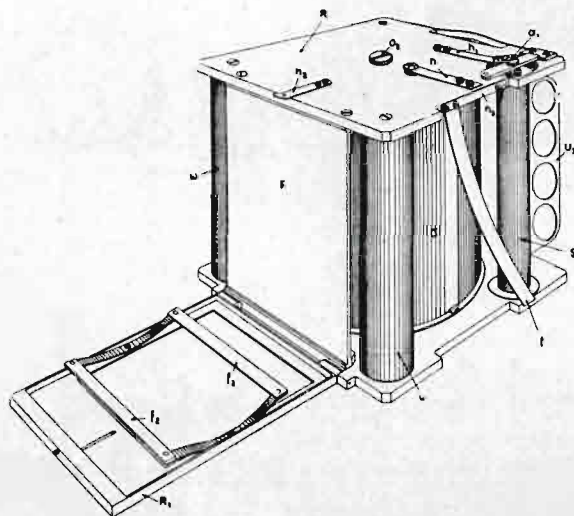
Vue du côté de l'opérateur
 (châssis entr'ouvert)

C — cylindre
 R — encadrement du cylindre
 S — bobine pour pellicule
 T — accouplement de l'axe du limaçon avec l'axe du cylindre

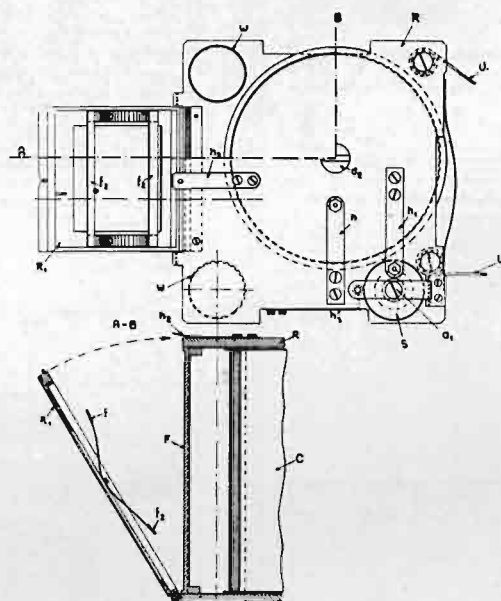


Vue du côté de la chambre noire

K_2 — cliquet d'accouplement
 K_1 — arc de découplément
 U_1 — érou pour fixer le châssis
 U_2 — anse du châssis
 U_3 — anses de l'encadrement



f — ressort d'attache de la pellicule
 F — glissoir soutenant la pellicule



w — cylindres dirigeants la pellicule
 h_1 — frein de la bobine

Fig. 8b et 8c. Châssis de l'appareil photographique avec cylindre encadré séparément.

et du côté postérieur, à une distance moyenne de 90,37 cm de l'objectif, d'un oculaire à distance focale $f' = 2,7$ cm sur crémaillère.

Ce système optique permet d'obtenir sur le cliché une image quatre fois grandeur naturelle d'un objet se trouvant à une distance de 3,5 m de l'objectif.

b. Le châssis et le déroulement de la pellicule.

Le châssis renferme un cylindre en laiton C de 11 cm de diamètre tournant sur son axe longitudinal, destiné à recevoir la pellicule sensible, qui est fixée directement sur ce cylindre ou guidée par lui. L'axe du cylindre, prolongé à l'extérieur du châssis,

porte une bobine en limaçon r_2 pour enrouler un cordon inextensible. Un petit moteur électrique (fig. 9) de 0,5 cheval-vapeur avec réduction des tours à 50 par minute, reposant séparément sur le fondement, tire le cordon dont l'autre bout est enroulé sur le limaçon du cylindre et déroule la pellicule sensible.

La bobine en limaçon r_1 du moteur se compose de parties de différent diamètre, ce qui permet d'adapter l'enroulement du cordon à la vitesse du train ainsi qu'à la durée de l'exposition qu'on désire. L'accouplement du limaçon r_1 à l'axe du moteur et son découplage sont opérés automatiquement sous l'action du premier essieu de la locomotive sur des contacts facilement déplacés (fig. 14), qu'on fixe près d'une file de rails.

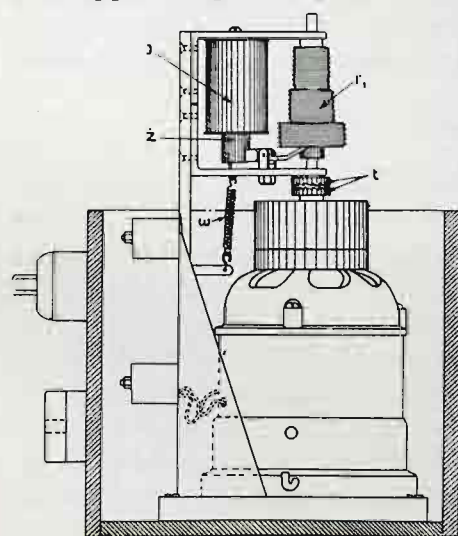
Pour limiter l'exposition à la longueur de la pellicule qui enveloppe le cylindre, le limaçon du châssis est muni d'un mécanisme $K_1 K_2 K_3$ qui découple le cylindre (fig. 8a, 8b) du moteur après qu'il a fait un tour.

La monture d'arrière u de la chambre obscure servant à recevoir le châssis (fig. 7) peut être tournée de 90° sur l'axe de la lunette. De cette manière il est possible de dérouler la pellicule sensible en direction horizontale ou verticale et de recevoir sur cette pellicule des diagrammes des déplacements verticaux ou bien horizontaux des points qu'on observe. En observant le même point par deux appareils, il devient possible d'obtenir ces déplacements dans deux directions perpendiculaires l'une envers l'autre.

c. Contrôle du temps.

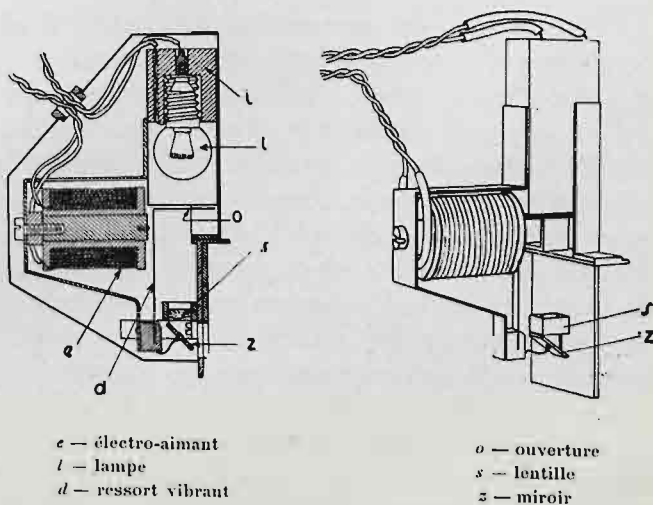
Au-devant du châssis on a placé dans sa partie supérieure un vibreur (fig. 10), éclairé d'une lampe électrique l . La lumière de cette lampe passe par un orifice o perforé dans le ressort vibrant, et étant réfléchi par le miroir z , donne sur la pellicule en mouvement une sinusoïde de vibrations d'une période de $1/50$ de seconde. Pendant la rotation du cylindre, le ressort vibrant d reçoit de l'électro-aimant e des impulsions à vibrer au moyen d'un interrupteur (fig. 8a) en forme de rondelle p placée sur l'axe du cylindre sous le limaçon r_2 . Les pellicules sensibles dans les châssis des deux appareils peuvent être mises en mouvement simultanément par un seul moteur électrique. Les deux vibreurs, bien réglés quant à la période des vibrations, sont actionnés par un seul appareillage, ce qui permet de synchroniser les épreuves avec grande précision.

Pendant les observations des déplacements horizontaux, la pellicule déroulée verticalement doit se mouvoir sur une surface plane pour éviter des inexactitudes qui proviendraient du glissement de l'image du



J — enroulement magnétisant
 z — noyau
 r_1 — limaçon pour fil
 w — ressort de découplage
 t — engrenage d'accouplement

Fig. 9. Moteur électrique déroulant la pellicule.



e — électro-aimant
 l — lampe
 d — ressort vibrant

o — ouverture
 s — lentille
 z — miroir

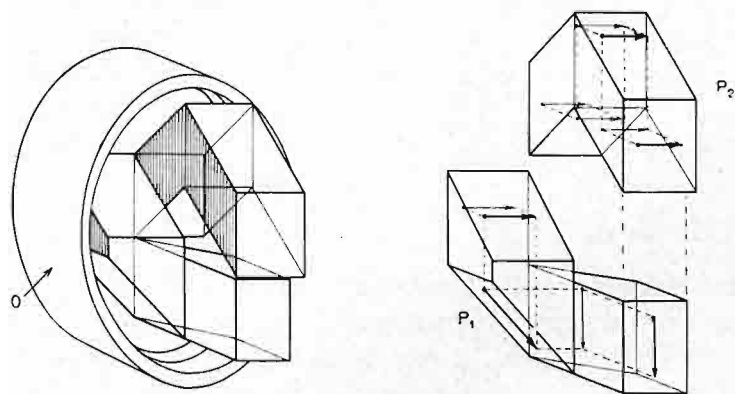
Fig. 10. Vibreur marquant les 0,02'' de pose.

point observé sur une surface inégalement éloignée de l'oculaire. Dans ce cas on a appliqué un châssis de construction spéciale (fig. 8 b, c) à cadre mobile, avec cylindre tirant la pellicule d'une bobine S , qui en contient une provision qui n'est pas limitée à un seul tour du cylindre.

d. Détour de l'image.

Quoique l'application de deux vibrateurs actionnés d'un seul endroit avait permis de trouver avec une exactitude suffisante les phénomènes simultanés observés au moyen de deux appareils, néanmoins on a décidé d'appliquer aussi d'autres arrangements encore plus perfectionnés. Notamment on a projeté un système de prismes qui permet d'obtenir simultanément des diagrammes de mouvements verticaux et horizontaux sur la même pellicule.

La construction de ces prismes, exécutée par les Etablissements optiques polonais à Varsovie, est indiquée sur la fig. 11. Etant placés dans la lunette de l'appareil immédiatement devant la monture du châssis (fig. 7 b), ces prismes détournent de 90° l'image



P_1 — prismes tournant l'image
 P_2 — prismes de compensation
 O — encadrement des prismes

Fig. 11. Système des prismes.

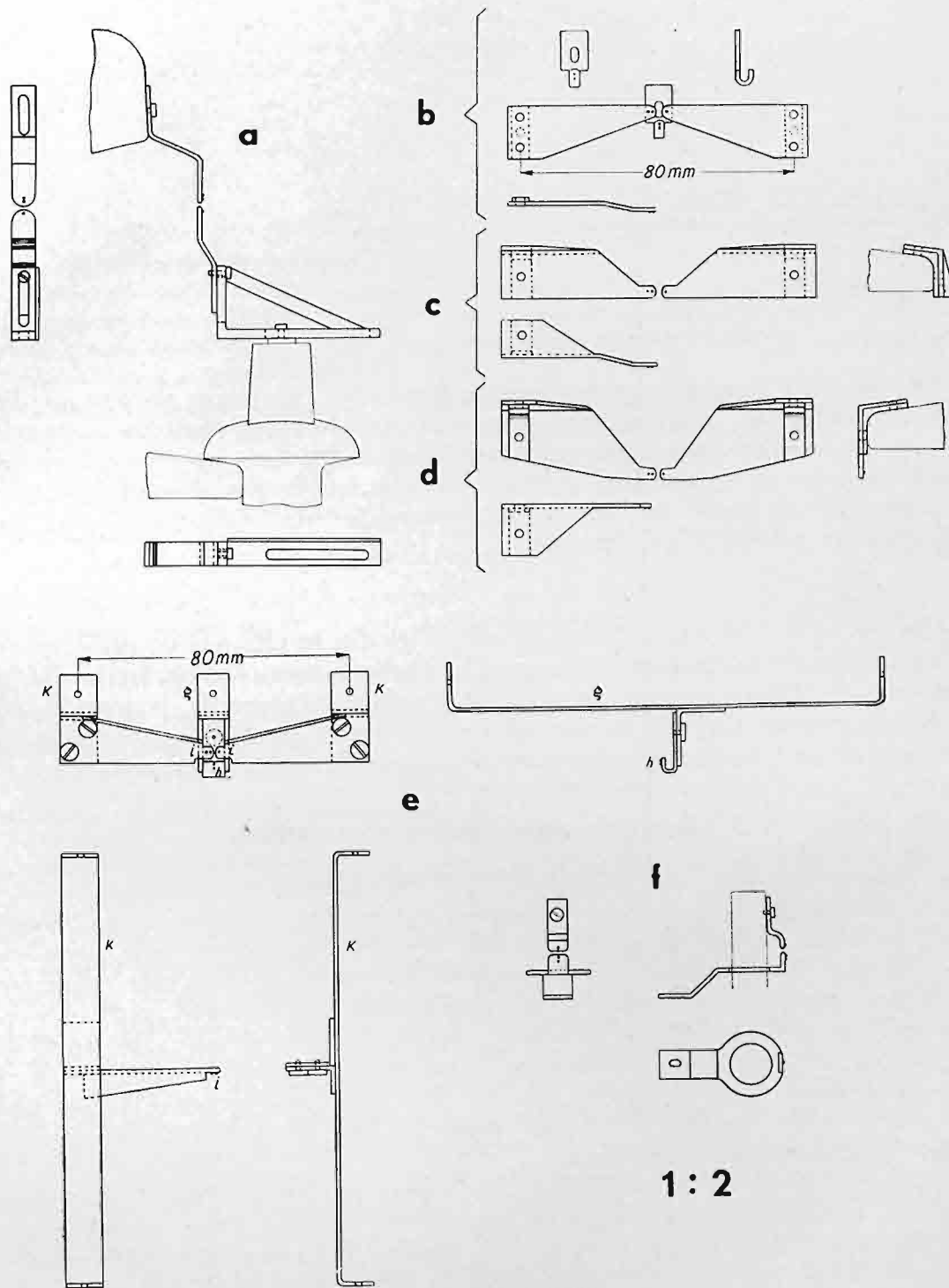
des mouvements verticaux d'un point qu'on veut observer, par suite de quoi, sur une pellicule déroulée verticalement on reçoit le diagramme photographique des mouvements verticaux à côté du diagramme des mouvements horizontaux. Vu que les prismes P_1 détournent l'image en augmentant un peu l'éloignement de l'oculaire, on a placé à côté de ces prismes, d'autres prismes P_2 , qui, sans détourner l'image, égalisent la longueur des rayons de lumière, traçant sur pellicule les mouvements horizontaux, à la longueur de ceux qui tracent les mouvements verticaux.

Un appareil muni de prismes remplace dans l'observation des mouvements simultanés verticaux et horizontaux deux appareils ordinaires, donnant en surplus des photographies sans reproche sous le rapport d'égalité d'échelle des deux genres de mouvements et de leur synchronisme, c'est pourquoi il fut constamment appliqué dans les observations de ce genre.

e. Marques des points observés.

L'image du mouvement des points à observer sur pellicule sensible, déroulée dans le châssis de l'appareil que nous venons de décrire, ne pourrait être obtenue que sous condition que, malgré le grand dispersément de lumière provenant du système optique de cet appareil, l'éclairage des marques de ces points soit suffisamment intense pour pose momentanée. Avec le système d'observation qu'on a adopté, cette condition a pu être remplie en employant, comme marques, de petits miroirs convexes en forme de billes en acier poli, éclairés du soleil ou d'une lampe à arc électrique. L'image de ces sources de lumière qui décroît avec le rayon de courbure du miroir, peut être réduite à un point d'un brillant très intense, donnant sur la pellicule déroulée un diagramme d'une grande finesse des mouvements les plus rapides de ce point, tandis que son entourage plus sombre ne produit sur la pellicule presque aucun effet.

Les billes en acier du genre de celles qui sont employées dans les coussinets, étaient pour la plupart de 1 mm de diamètre, calibrées à 0,001 mm d'exactitude. On pressait ces billes dans des cornières en laiton ou en aluminium, qu'on fixait avec des vis au point dont on désirait observer les mouvements (fig. 12). Une paire de billes pressées jusqu'à leur contact servait de contrôle d'échelle aux épreuves. On attachait une attention



Cornières servant à observer .

- a — l'abaissement du rail et de la traverse.
- b — les déplacements axiaux et les allongements des fibres au champignon.
- c, d — „ „ „ „ „ „ „ „ à l'arête du patin.
- e — „ „ „ „ „ „ „ „ du patin au droit de l'âme.
- f — la compressibilité de la traverse.

Fig. 12. Types de cornières pour marques.

spéciale à ce que les cornières soient légères et inflexibles pour éviter leurs vibrations libres et qu'elles soient fermement fixées au point observé.

On éclairait les billes exclusivement avec des lampes électriques à arc munies d'un miroir parabolique (fig. 13). Le courant continu pour alimenter ces lampes fut pris d'un

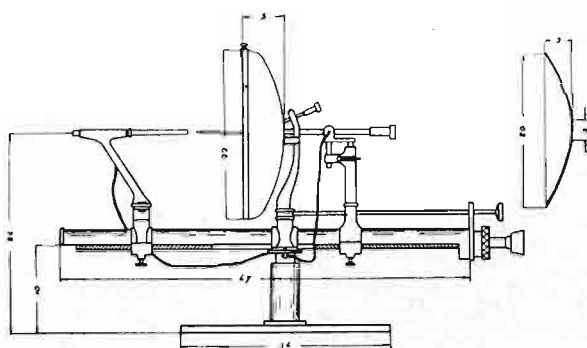


Fig. 13. Lampe électrique à arc pour éclairer les marques.

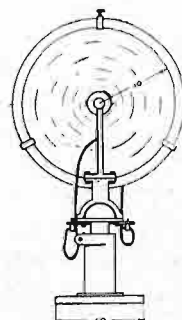


Fig. 14. Pédale électrique accouplant et découplant le moteur.

transformateur relié à la génératrice centrale de Pruszków. Une lampe placée à une distance de 1,5 m des billes, les éclairait plus fortement que le soleil dont on ne pouvait pas profiter, non seulement à cause du temps variable et de l'ombre que jetaient les véhicules, mais aussi par suite de ce que les parcours des locomotives expérimentées ont pu avoir lieu presque exclusivement pendant la nuit, quand les intervalles entre le passage des trains de l'horaire normal le permettaient.

f. Rôle de l'observateur.

Comme on le voit d'après ce qui vient d'être dit, le rôle de l'observateur consiste à faire les préparatifs nécessaires et à surveiller l'actionnement des appareils, puis encore à tirer le volet du châssis, couvrant la pellicule sensible, à l'approche du train au premier contact et à le pousser après le passage du premier essieu sur le deuxième contact. Tout le temps de la pose l'observateur ne touche ni l'appareil, ni son fondement.

5. Degré de précision des observations.

a. Stabilité du fondement des appareils.

Les déformations élastiques de la superstructure des chemins de fer, notamment les vibrations libres et les vibrations forcées sous la charge dynamique, permettant de calculer le travail de ses parties constitutives, et surtout les allongements et les raccourcissements des fibres des matériaux attestant immédiatement leur travail, sont excessivement petits. Il est donc indispensable de se rendre compte du degré de précision des mesurages appliqués dans les procédés d'observation, ainsi que du degré de stabilité des repères par rapport auxquels ces mesurages ont été faits, pour se convaincre à quel genre de déformations et dans quelles limites ces procédés sont propres à être appliqués pour donner des résultats suffisamment exacts.

Il s'agit d'abord de la stabilité du fondement qui sert d'appui aux appareils, c'est-à-dire de la stabilité de la plaque en béton armé sur piles. Pour se convaincre de la grandeur des mouvements qu'elle a pu souffrir pendant le passage des trains, on a essayé de photographier de la plaque un repère situé de l'autre côté de la voie à une distance d'à peu près 30 m de l'objectif, c'est-à-dire d'à peu près 35 m des rails, en supposant que, à cette distance, le terrain ne devait plus être sujet à des tremblements occasionnés par le passage des trains. Ces photographies, qui ont été faites avec les mêmes appareils que ceux qui ont servi aux observations de la voie, après quelques modifications dans le système des lentilles, ont démontré, que les déplacements de la plaque par rapport au repère étaient peu significatifs; cependant elles n'ont pas pu écarter des doutes, si ces différences ne provenaient des tremblements possibles du repère même et des vibrations de l'atmosphère, qu'on n'a pas pu éviter à cette distance à proximité du sol.

Pour écarter ces doutes on a décidé d'examiner les mouvements du fondement au moyen d'un vibrographe. Grâce à la permission du directeur de l'Institut géologique de

TABLEAU IV.
Vibrations du fondement des appareils.

Endroit et conditions du mesurage	Vibrations verticales			Vibrations horizontales					
				transversales			longitudinales		
	50 m avant	pendant	après	50 m avant	pendant	après	50 m avant	pendant	après
	le passage de la locomotive			le passage de la locomotive			le passage de la locomotive		
<i>Plaque en béton du côté de Varsovie</i>									
Train suburbain, locomotive Okl 27	0,0026	0,0167	—	—	—	—	0,0024	0,0072	—
Train express, locomotive Ok 22	0,0006	0,0024	0,0062	0,0007	0,0062	0,0073	—	—	—
Train omnibus, locomotive Ok 1	0,0018	0,0078	—	0,0018	0,0045	—	—	—	—
<i>Plaque en béton du côté de Pruszków</i>									
Train suburbain, locomotive Okl 27	0,0005	0,0070	0,0100	0,0022	0,0100	0,0100	—	—	—
Train suburbain, locomotive Ok 1	0,0008	0,0140	0,0167	0,0019	0,0156	0,0167	—	—	—
Train omnibus, locomotive Ok 1	0,0007	0,0009	0,0007	0,0019	0,0024	0,0019	—	—	—
Transformateur en mouvement	0,0015	0,0010	—	—	—	—	—	—	—
Moteur de pellicule en mouvement sur plaque en béton	0,0001	0,0001	—	—	—	—	—	—	—
Chariot sur chaussée à 20 m de l'appareil	0,0072	0,0072	—	—	—	—	—	—	—
<i>Base métallique de l'appareil du côté de Pruszków</i>									
Train suburbain, locomotive Okl 27	0,0006	0,0045	0,0072	0,0012	0,0036	0,0072	—	—	—
Transformateur en mouvement	0,0001	0,0003	—	—	—	—	—	—	—
Moteur accouplé avec le limaçon du châssis	0,0007	0,0009	—	—	—	—	—	—	—
<i>Base métallique de l'appareil du côté de Varsovie</i>									
Train suburbain, locomotive Okl 27, transformateur et moteur en mouvement	0,0028	0,0050	—	—	—	—	—	—	—
	0,0024	0,0050	—	—	—	—	—	—	—
Trains express, locomotive Ok 22, transformateur et moteur en mouvement	0,0011	0,0117	—	—	—	—	—	—	—
Transformateur en mouvement	—	0,0015	—	—	—	—	—	—	—
Transformateur et moteur en mouvement	—	0,0022	—	—	—	—	—	—	—

Varsovie, M. l'ingénieur Morozowicz, le géophysicien de cet Institut, M. Janczewski a pris au moyen d'un vibrographe des établissements Askania-Werke Friedenau, période 0,07 sec., agrandissement 17900, plusieurs épreuves, qui ont suffisamment démontré la grandeur des vibrations du fondement. On a ajusté le vibrographe: 1° sur la plaque en béton armé, des deux bouts, 2° au milieu des bases en fer des appareils. On a fait les épreuves des vibrations verticales et des vibrations horizontales perpendiculaires et parallèles à la voie: 1° pendant le passage d'un train sur la voie observée sans que les mécanismes du transformateur et du moteur des pellicules soient en mouvement ainsi que simultanément avec l'opération de ces mécanismes; 2° exclusivement pendant le mouvement du moteur déroulant la pellicule; 3° exclusivement pendant le mouvement du transformateur alimentant les lampes; 4° à l'état immobile de ces appareils dans les intervalles entre le passage des trains.

Les valeurs de l'amplitude des vibrations du fondement des appareils d'après les diagrammes du vibrographe sont indiquées dans le tableau IV.

En examinant les chiffres du tableau IV, on remarque d'abord que les vibrations horizontales de la plaque en béton du fondement ont des valeurs du même ordre. Les vibrations occasionnées par le mouvent du transformateur et du moteur posé sur la plaque atteignent 0,0015 mm, et les vibrations du milieu de la base en fer des appareils ne surpassent pas 0,002. L'exactitude des mesurages sur comparateur est en moyenne de 0,006 mm, par conséquent, l'influence des vibrations de la base des appareils sur l'exactitude des observations peut être négligée.

Il reste à examiner la grandeur des vibrations de la plaque en béton et des bases des appareils pendant le mouvement des trains et spécialement au moment du passage de

la locomotive à côté du fondement des appareils, vu que ce fut le moment de l'exposition des pellicules. Les amplitudes maxima des vibrations observées de la plaque en béton sont les suivantes: vibrations verticales 0,0167 mm, vibrations horizontales transversales 0,0156 mm, vibrations longitudinales 0,0072 mm. Les amplitudes maxima des vibrations du milieu des bases en fer sont: vibrations verticales 0,0117 mm, vibrations horizontales transversales 0,0036 mm.

L'exactitude des épreuves devrait être appréciée en tenant compte des vibrations des bases qui soutiennent immédiatement les appareils. Il se peut que la grandeur de ces vibrations fut avantageusement réduite en comparaison des vibrations du fondement en béton par suite de l'application des feuilles en rubéroïde, qu'on avait mises sur les poutres longitudinales en fer aux points d'appui des bases des appareils. Vu, cependant, que l'amplitude des vibrations variait dans d'assez larges limites, il paraît plus prudent d'apprécier l'exactitude des épreuves d'après les amplitudes maxima des vibrations de la plaque en béton ¹⁾.

En déterminant l'influence des vibrations du fondement sur l'exactitude des épreuves des déformations verticales, il est indispensable de considérer non seulement les vibrations verticales, mais aussi les vibrations horizontales transversales occasionnant une inclinaison de la lunette de l'appareil. Les pieux du fondement sont plantés libres jusqu'à une profondeur de 5,25 m de la surface supérieure de la plaque sur laquelle on a mesuré les vibrations transversales et le niveau de leur encastrement peut être supposé à la demi-profondeur de leur enfoncement dans le sol, c'est-à-dire à 2,50 m plus bas. Les points observés de la voie se trouvent à une distance de 4,20 m du milieu du fondement. Par suite, l'amplitude maximale 0,0156 des oscillations transversales de la plaque, réduite au point observé, se monte à

$$0,0156 \cdot \frac{4,2}{7,75} = 0,0085 \text{ mm}$$

et, en y ajoutant l'amplitude maximale des vibrations verticales,

$$0,0085 + 0,0167 = 0,0252 \text{ mm.}$$

Il s'ensuit que le concours le moins favorable des deux genres de vibrations peut occasionner une faute dans l'observation allant jusqu'à $\pm 0,0126$ mm.

La faute possible dans l'observation des mouvements axiaux se monte à $\pm 0,0036$ mm. Il faut remarquer cependant que cette faute ne peut être appliquée au mesurage des allongements, et, par conséquent, au travail du rail, vu que ces allongements sont reçus comme différence des deux points observés.

b. Mesurage sur pellicules des déformations observées.

On a mesuré les déformations par rapport à une ligne de référence tracée par le point observé en état de repos, parallèlement à la direction du mouvement de la pellicule. Si la déformation fut élastique, l'abscisse de la position primitive du point en repos passait aussi par le point en repos après le passage du train.

On remarquait si la position du point observé sur la plaque dépolie n'avait pas changé après l'exposition, et on photographiait en forme d'une courte droite la position de repos de ce point avant et après le passage du train en tournant un peu le cylindre de la pellicule.

La ligne sinusoïde du temps, tracée par un point du châssis, indique exactement la direction du mouvant de la pellicule. Cette ligne rend possible de noter sur la pellicule très exactement l'ordonnée primitive et de vérifier la position immobile du point observé avant et après l'observation. Lors des observations de 1933, on a employé des

¹⁾ Il est intéressant de noter que l'amplitude des vibrations de la plaque en béton pendant le passage d'un fourgon pas très lourd à un cheval, sur une chaussée qui va parallèlement à la voie ferrée à une distance de 20 m du fondement des appareils, atteignait 0,0072 mm.

châssis, dans lesquels les pellicules, déroulées entre deux cylindres, avaient un petit jeu transversal, par suite de quoi l'abscisse primitive n'était pas toujours droite. Pour les observations de 1934, on a employé des châssis de construction améliorée, qu'on a décrit plus haut, qui a presque entièrement obvié à cet inconvénient.

c. La finesse des traits des épreuves.

Les diagrammes photographiques sont tracés sur les pellicules par l'image de la source de lumière réfléchie dans un miroir convexe en forme d'une petite bille en acier de 1 mm de diamètre, fixée au point dont on désire relever les mouvements. On a employé comme source de lumière des lampes électriques à arc, avec un miroir parabolique, alimentées de courant continu. Le cratère du charbon positif, d'environ 5 mm de diamètre, placé dans le foyer du miroir parabolique à 75 mm de surface, jette dans la direction du point observé des rayons parallèles.

Il s'ensuit que l'image du cratère du charbon dans le miroir parabolique est énorme et excessivement éloignée. Le rapport du diamètre A de cette image à son éloignement a du miroir est égal au rapport du diamètre du cratère à l'éloignement du miroir de ce dernier:

$$A : a = 5 : 75 = 1 : 15.$$

Le diamètre B de l'image dans la bille, étant un miroir convexe, peut être calculé d'après la formule $B = \frac{Af}{a+f}$ dans laquelle f exprime la distance focale de la bille, égale à la moitié de son rayon de courbure, c'est-à-dire $f = 0,25$ mm.

La distance focale f étant très petite, on peut mettre

$$B = \frac{A}{a} \cdot f = \frac{1}{15} \cdot 0,25 = 0,0167 \text{ mm.}$$

Puisque l'appareil photographique donne une image quatre fois grandeur naturelle, le point lumineux trace sur la pellicule un trait de $0,0167 \cdot 4 = 0,067$ mm d'épaisseur. Ce trait est en réalité d'une épaisseur un peu plus grande, et ses bords sont un peu plus pâles que le milieu, par suite de la lumière jetée par le bout de l'autre charbon de la lampe, ainsi que par suite de ce que le miroir reflète non seulement par sa surface argentée, mais aussi par la surface extérieure en verre.

d. Exactitude des mesurages sur pellicules.

Certains mesurages sur pellicules qui n'exigeaient pas une grande exactitude, ont été faits sous loupe au moyen d'une échelle argentée, divisée en 0,2 mm, ce qui permettait de lire les 0,05 mm vu que l'échelle des épreuves était quatre fois grandeur naturelle. Pour mesurer la plupart des mouvements verticaux et tous les mouvements horizontaux dans la direction de l'axe de la voie, ce degré d'exactitude n'était pourtant pas suffisant et on les mesurait sur un comparateur, connu sous le nom de „coordinatographe système Coradi”, à l'établissement de géodésie supérieure de l'École Polytechnique de Varsovie grâce à l'aimable permission du directeur de cet établissement le professeur E. Warchałowski. Ce comparateur permet d'apprécier les distances dans les deux directions perpendiculaires entre elles jusqu'à 0,004 mm, ce qui, vu l'agrandissement sur pellicule quatre fois grandeur naturelle, correspond à une exactitude de mesurage de 0,001 mm.

Pour apprécier l'erreur probable d'une cote lue, ainsi que de la différence de deux cotes, trois observateurs ont fait avec le comparateur dix visées, chacun des mêmes points d'un diagramme des déformations observées, sur pellicule d'une bonne netteté d'image ainsi que d'une netteté un peu faible. Aux résultats obtenus on a appliqué la méthode de la théorie de probabilité. La racine carrée de la somme des carrés des différences des visées et de la visée moyenne atteignit comme maximum pour un point en trois

groupes d'observations $\pm 1,65 \cdot 10^{-3}$, et par suite, pour la différence de deux points $\pm 1,65 \sqrt{2} \cdot 10^{-3} = \pm 2,35 \cdot 10^{-3}$ mm d'erreur probable.

Cette erreur est également probable pour les visées de la différence dans la position des marques en état de repos et dans leur position sous charge. Il en résulte, que l'allongement mesuré sera soumis à une erreur probable de $2,35 \sqrt{2} \times 10^{-3} = 3,30 \times 10^{-3}$ mm. Les tensions du métal d'un rail furent mesurées d'après les changements de longueur des fibres entre deux points écartés de 80 mm l'un de l'autre. Par conséquent, l'erreur probable dans le mesurage de ces changements de longueur correspond à une différence de tension de

$$\sigma = \pm 3,5 \cdot \frac{E}{80 \times 1000} = \pm \frac{3,5 \times 22000}{80000} = \pm 0,91 \text{ kg/mm}^2.$$

e. Agrandissement des épreuves.

Pour mieux étudier certains détails des déformations, comme vibrations libres des rails, retards de leur abaissement etc., ainsi que pour faciliter l'exécution des graphiques, on a tiré de beaucoup de pellicules des copies sur papier en bromure d'argent, agrandies douze fois et demie, ce qui a permis d'obtenir des épreuves 50 fois grandeur naturelle. Ces agrandissements, très précieux sous certains rapports, n'ont pas pu donner une plus grande précision aux mesurages, à cause d'une grande épaisseur de traits, et en même temps de leur moindre netteté.

f. Rapport de la tension maximum à la tension observée.

On a évalué les tensions dans le rail d'après l'allongement des fibres entre deux points situés à une distance de 80 mm l'un de l'autre. Dans ces points on a fixé les cornières portant les marques devant servir à l'observation.

L'allongement par unité de distance des marques, mesuré dans ces conditions, répondait non pas à la valeur maximum de la tension entre les points observés, mais à sa valeur moyenne. Pour calculer le rapport entre ces deux valeurs de tension, examinons le cas le moins favorable de position de la charge au milieu entre les deux points observés. Le moment M_0 au point d'application de la charge a la valeur

$$M_0 = \frac{PL_s}{4} \quad \text{où } L_s = a \sqrt{\frac{2}{3}} \gamma = 96,5^1)$$

tandis que la valeur du moment M_4 à une distance $x = 4$ cm des deux côtés du point de milieu est

$$M_4 = \frac{PL_s}{4} e^{-\xi} (\cos \xi - \sin \xi) \quad \text{où } \xi = \frac{x}{L_s} = \frac{4}{96,5} = 0,04144.$$

Pour cette valeur de ξ on trouve

$$M_4 = \frac{PL_s}{4} \cdot 0,9206$$

Sur la longueur de 4 cm entre le point d'application de la charge et la marque, le moment subit un changement presque exactement linéaire, par conséquent sa valeur moyenne est

$$M_m = \frac{PL_s}{4} \cdot \frac{1,9206}{2} = \frac{PL_s}{4} \cdot 0,9603$$

c'est à dire de 4% moindre de la valeur maximum du moment au point d'application de la charge. Il s'ensuit que pour obtenir la valeur maximum de la tension au point observé, il faut augmenter la tension observée tout au plus de 4%.

¹⁾ Voir formule (21) ci-dessous.

g. Influence de la température.

La lampe à arc éclairant les cornières qui portent les marques fixées au rail, produit des changements de température des cornières ainsi que du rail pendant l'observation. Les changements de température de ces deux objets diffèrent, vu la grande différence de leurs masses. L'erreur dans le calcul de la tension n se monte à $\Delta n = \alpha E$ par degré de changement de la différence de température des cornières et du rail pendant l'observation, α coefficient de dilatation de la matière des cornières, E coefficient d'élasticité de l'acier du rail.

En posant $\alpha = 0.000022$ (pour aluminium), $E = 22\,000 \text{ kg/mm}^2$ on obtient $\Delta n = 0.484 \text{ kg/mm}^2$.

Quoique la durée de l'observation ne surpassait ordinairement deux secondes et quoiqu'on tâchait de photographier les marques en état de repos avant l'observation aussi vite que possible, il n'est pas exclu que pendant ce temps le changement de température des cornières pouvait s'évaluer à quelques degrés en produisant une erreur jusqu'à 1 kg/mm^2 .

Pour diminuer l'influence de la température on a essayé de faire passer la lumière des lampes à travers des filtres d'eau, ce qui cependant ne pouvait être appliqué que rarement, vu la réduction de l'intensité de l'éclairage qu'ils produisaient.

II. Coefficient de l'assise des traverses.

1. Importance de l'étude du coefficient de l'assise des traverses.

L'étude des déformations élastiques de la superstructure dans le but de déterminer sa résistance peut comporter, ou bien le mesurage direct des tensions d'après les changements de la longueur des fibres, ou bien l'observation des flexions du rail et de l'abaissement de ses appuis pour déterminer théoriquement le travail de la superstructure d'après les forces qui agissent. Pour calculer le travail de la superstructure sous charge en repos il est indispensable de connaître les coefficients de l'élasticité des matériaux qui la composent.

Parmi ces données, le coefficient de l'assise des traverses est celui qu'on connaît le moins. Ce coefficient qui exprime la relation entre la pression p de la face inférieure de la traverse sur le ballast et l'abaissement y de la traverse, à savoir

$$C = \frac{p \text{ kg/cm}^2}{y \text{ cm}} \quad (1)$$

détermine l'élasticité de l'appui du rail et, par suite, son travail sous l'action de la charge.

D'après les observations faites au chemin de fer de Varsovie-Vienne sur un remblai de sable mêlé d'argile de 1.5 m de hauteur, on a obtenu un coefficient de l'assise en cas de ballast en pierre concassée $C = 4.1$, et en cas d'un ballast en sable mêlé d'argile $C = 5.4$. H. Zimmermann dans son ouvrage sur la superstructure¹⁾ prend pour base de ses calculs les observations de Haentschel aux chemins de fer de l'Alsace-Lorraine, d'après lesquelles la valeur du coefficient de l'assise des traverses fut obtenue: en cas de ballast en gravier $C = 3$ et en cas de ballast en gravier sur une couche pavée $C = 8$, et démontre la grande influence de ce coefficient sur le travail du rail.

D'un autre côté, le rapport de MM. Baumann et Jaehn au Congrès des chemins de fer de 1935 au Caire fait voir que les ingénieurs allemands ont une opinion divergente en ce qui concerne l'influence du coefficient de ballast sur les tensions calculées, puisque à mesure que la valeur de ce coefficient augmente les tensions deviennent de plus en plus faibles. D'après la méthode recommandée en 1930 par le Verein, l'influence du ballast et de la plate-forme est négligée. Le Verein a entrepris des essais en vue de déterminer

¹⁾ Berechnung des Eisenbahnoberbaues. Berlin 1888 et 1930 pages 119 et 219.