

Zeitschrift: Revue Militaire Suisse
Herausgeber: Association de la Revue Militaire Suisse
Band: 97 (1952)
Heft: 7

Artikel: La solution mécanique du problème de la balistique extérieure
Autor: Curti, P. / Dubois, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-348492>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 06.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

REVUE MILITAIRE SUISSE

Rédaction - Direction : Colonel - brigadier Roger Masson

Rédacteur - Adjoint : Major EMG Georges Rapp

Administration : Lt - Colonel Ernest Buetiger

Editeurs et expédition : Imprimeries Réunies S. A., Av. Gare 33, Lausanne
(Tél. 23 36 33 — Chèq. post. II. 5209.)

Announces : Publicitas S. A. succursale, Rue Centrale 15, Lausanne

ABONNEMENT : Suisse : 1 an Fr. 12.— ; 6 mois Fr. 7.— ; 3 mois Fr. 4.—
Etranger : 1 an Fr. 15.— ; 6 mois Fr. 8.— ; 3 mois Fr. 4.50
Prix du numéro : Fr. 1.50

La solution mécanique du problème de la balistique extérieure

Le tracé des trajectoires ou des familles de trajectoires, en partant des conditions initiales du tir, des caractéristiques du projectile et de l'état de l'atmosphère en fonction de la hauteur, a été effectué jusqu'ici par un procédé calculo-graphique (par exemple méthode par arcs successifs). Ce procédé a deux défauts. Il est insuffisamment exact en raison du calcul de chaque arc partiel avec plusieurs valeurs moyennes constantes au lieu des valeurs effectives à variation continue. Il exige de plus une grande dépense de temps (pour une seule trajectoire environ 4 jours de travail d'un balisticien entraîné).

La tendance dominante actuelle de la balistique extérieure est donc la réalisation d'intégraphes balistiques traçant automatiquement les trajectoires de manière mathématiquement rigoureuse et dans un minimum de temps.

Le présent article donne la description du grand intégraphe réalisé par les auteurs pour le Service technique militaire. Cet appareil a été précédé d'un prototype d'essai partiellement

simplifié (fig. 1) étudié en collaboration par les auteurs et construit d'après leurs plans par les ateliers de fine mécanique Haag-Streit à Berne. Ce prototype figure comme modèle de démonstration dans la collection de la Division militaire de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich¹.

Une description de l'intégraphe a déjà été publiée dans la *Schweiz. Bauzeitung* du 15 janvier 1949. La description ci-dessous est plus complète et tient compte de tous les perfectionnements apportés à l'intégraphe jusqu'à ce jour.

1. PRINCIPE.

L'intégraphe réalise l'intégration automatique des 4 équations simultanées fondamentales de la balistique extérieure, écrites sous la forme suivante :

$$(1) \frac{dv}{dt} = - (q + g \sin \theta)$$

(équilibre suivant la tangente à la trajectoire).

$$(2) \frac{d\delta}{dt} = - \frac{g \cos \theta}{v}$$

(équation de l'hodographie)

$$(3) \frac{dx}{dt} = v \cos \theta$$

(composante horizontale de la vitesse)

$$(4) \frac{dy}{dt} = v \sin \theta$$

(composante verticale de la vitesse)

avec les notations :

t = temps

q = résistance de l'air rapportée à la masse du projectile,
 m/s^2

g = accélération terrestre, m/s^2

¹ P. CURTI : *Aeussere Ballistik*. Huber & C^{ie}, éditeurs, Frauenfeld (Suisse) 1945, p. 7 de l'appendice illustré.

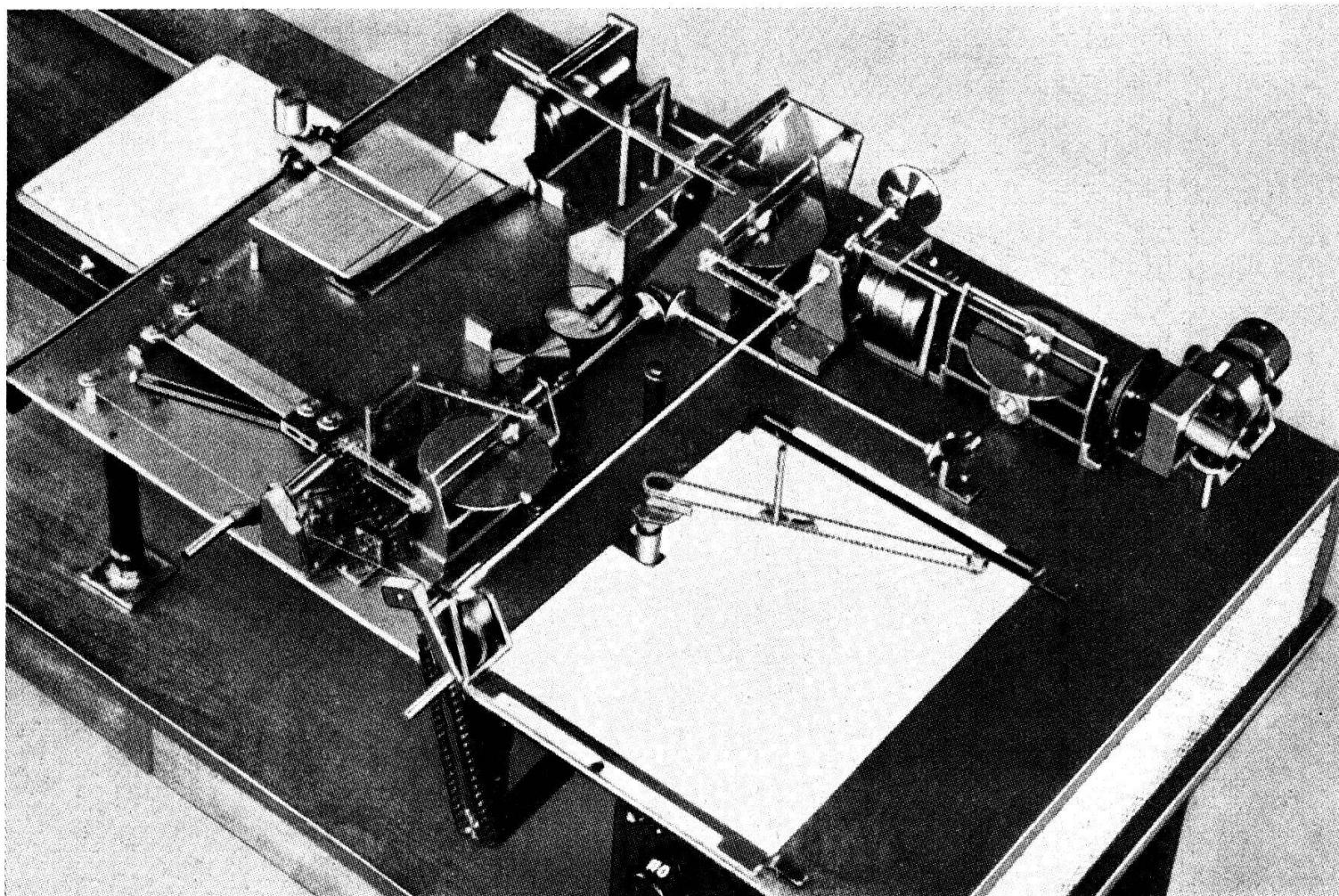


FIG. 1. — Prototype 1941/42.

v = vitesse du projectile, m/s

θ = inclinaison de la tangente à la trajectoire sur l'axe des x , radians

x = abscisse du projectile, m

y = ordonnée » » , m au-dessus de la mer.

La résistance de l'air q est réalisée de manière thermodynamiquement rigoureuse en partant de l'ordonnée y , du gradient prédéterminé de la température, $\lambda^o C/1000 m$ = fonction de y d'après sondage, et de la vitesse du projectile v .

L'hodographe $v = f(\theta)$ et la trajectoire $y = f(x)$ sont enregistrés automatiquement l'un et l'autre avec des marques régulières de temps.

Les éléments t , θ , v , x , y de la trajectoire sont indiqués par des compteurs-totalisateurs à remise au zéro. Enfin les valeurs simultanées de ces éléments sont enregistrées photographiquement sous forme de tableau de chiffres. L'intégraphe déclenche l'obturateur de la camera à intervalles équidistants et ajustables de l'une des trois variables t , x ou y .

2. DESCRIPTION.

L'intégraphe est entièrement mécanique et se rattache au type connu sous le nom de « Differential Analyzer », selon la terminologie introduite par l'américain V. Bush. On sait que dans les appareils de ce genre toutes les variables et fonctions sont matérialisées sous la forme de *rotations*. La machine fonctionne en circuit fermé et se « dirige » elle-même.

L'intégraphe se subdivise au point de vue fonctionnel en trois parties principales (fig. 2) :

- a) le mécanisme de résistance de l'air
- b) le mécanisme d'intégration et
- c) le mécanisme d'enregistrement et de comptage.

A celles-ci s'ajoutent : d) les auxiliaires électriques desservant les 3 mécanismes principaux a), b) et c).

La table de l'intégraphe (fig. 3 et 4) est longue d'environ 4 m. et large d'environ 1 m. ; sa conception est adaptée à la constitution organique de celui-ci. Elle se compose de 3 tronçons assemblés par boulons. Le tronçon de gauche porte le mécanisme de résistance de l'air ; le tronçon intermédiaire les intégrateurs *b*) groupés dans l'ordre logique des équations (1) à (4) ; enfin le mécanisme d'enregistrement et de comptage *c*) est placé en majeure partie sur le tronçon de droite et son reste sur le tronçon intermédiaire. Les auxiliaires électriques sont réunis sur une console au-dessous du tronçon de gauche.

a) *Mécanisme de résistance de l'air.*

Ce mécanisme est basé sur la formule moderne de la résistance des projectiles¹ :

$$q = C_{no} \frac{B_y}{B_{no}} F(m)$$

où les symboles ont la signification suivante : C_{no} = coefficient balistique, m^{-1} , fonction des : calibre a , ogive h/a et

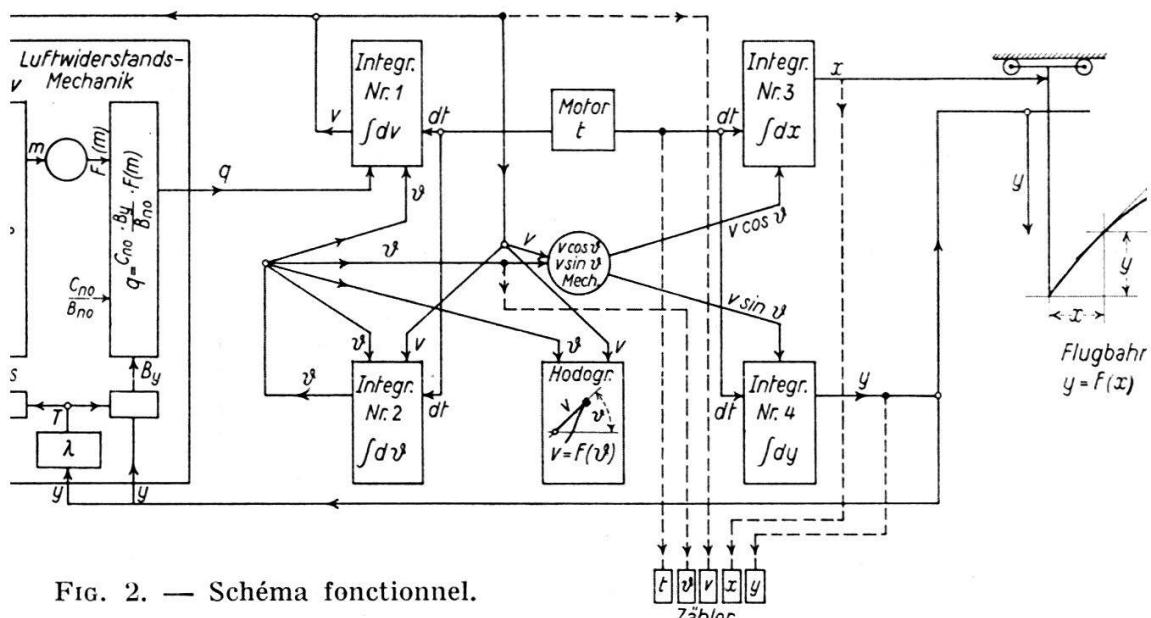


FIG. 2. — Schéma fonctionnel.

¹ DUFRÉNOIS et ROUZIER : *Les méthodes actuelles de la balistique extérieure*. Paris, Gauthier-Villars 1921. — P. CURTI : *Aeussere Ballistik*, déjà cité.

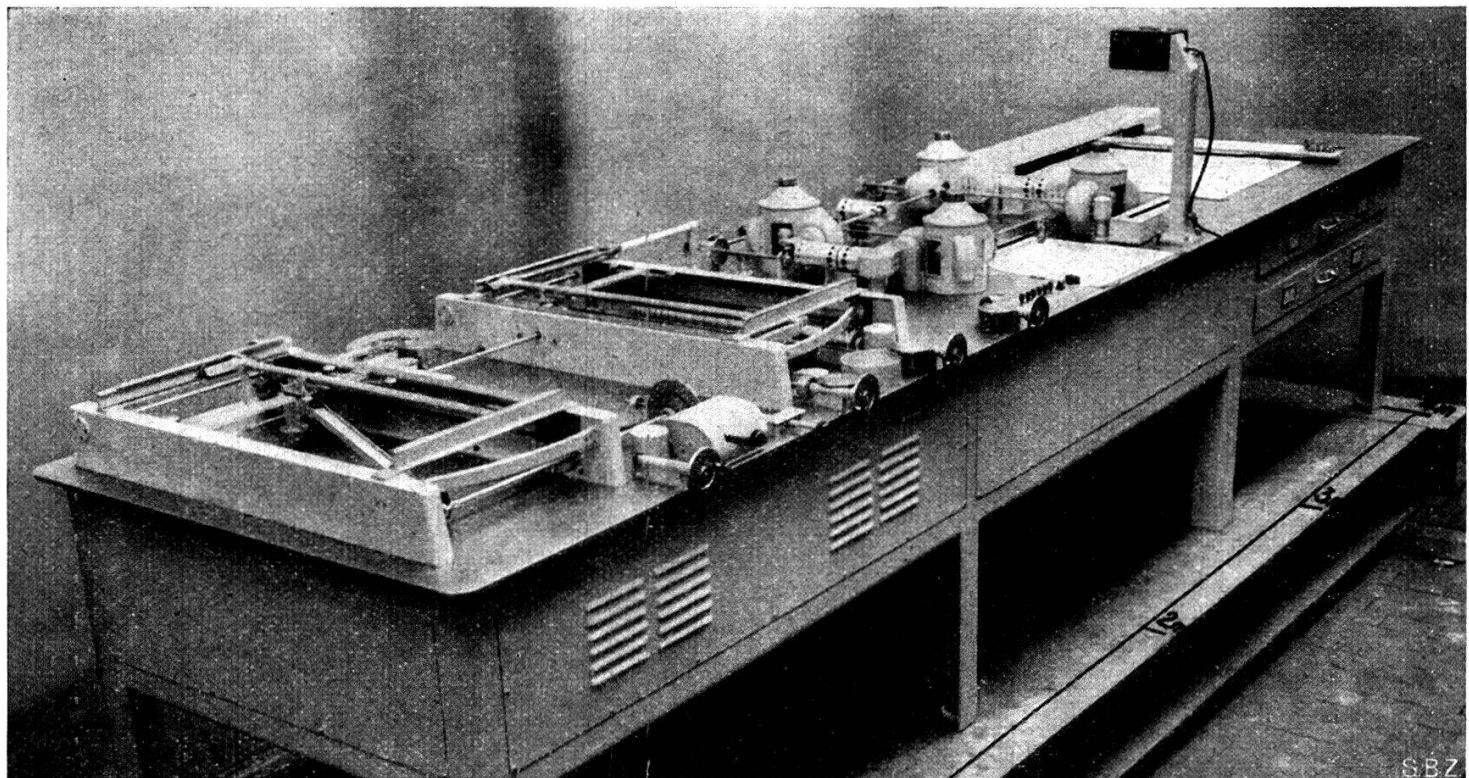


FIG. 3. — Grand intégraphe, vue de devant à gauche.



FIG. 4. — Grand intégraphe, vue de devant à droite.

poids P du projectile, ainsi que de la densité standard δ_{no} de l'air ; B_y respectivement B_{no} = pression barométrique à la hauteur y , respectivement à la hauteur de référence y_{no} au dessus de la mer ; $F(m)$ = fonction de résistance de l'air, $(m/s)^2$; m = nombre de Mach du mouvement relatif de l'air fixe par rapport au projectile mobile.

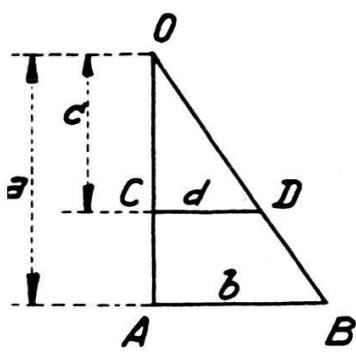
A la partie médiane antérieure du mécanisme des q (fig. 3, à gauche), une boîte de vitesses à engrenages, à réglage par gradins correspondant à différentes valeurs positives ou négatives du gradient λ , permet de reproduire sous la forme d'une succession de sections à loi linéaire $t_y = t_1 + \lambda y$ une répartition quelconque, suivant la verticale y du lieu, de la température en degrés centigrades t_y , respectivement absolue $T_y = t_y + 273^\circ$. De T_y un organe approprié (corps profilé) déduit l'inverse de la vitesse du son $1/s = 1/\sqrt{g k R T_y}$ (g = accélération terrestre, $k = \frac{C_p}{C_v}$ = exposant de l'adiabatique et R = constante des gaz = 29,27 pour l'air). La vitesse du projectile v et l'inverse de la vitesse sonique $1/s$ sont introduits dans un mécanisme de multiplication à triangles semblables (tout à la gauche), qui donne le rapport $v/s = m$ = nombre de Mach¹. Enfin une came spirale, de rotation proportionnelle à m (milieu arrière du tronçon de table), transforme

¹ Dans les 2 triangles semblables à bases parallèles OAB, OCD, on a :

$$\frac{b}{a} = \frac{d}{c}$$

$$\text{d'où } d = \frac{b \cdot c}{a} \text{ ou encore } = \frac{1}{a} \frac{b}{\frac{1}{c}}$$

Si l'un des côtés, par exemple $OA = a$, est maintenu fixe et la configuration BDC rendue, par une réalisation appropriée, déformable, mais de manière telle que les deux points B et D soient constamment alignés sur le sommet O , le segment d représentera à l'échelle $\frac{1}{a}$ soit le produit $b \cdot c$, soit le quotient $\frac{b}{\frac{1}{c}}$.



le nombre de Mach en un mouvement linéaire proportionnel à la fonction de résistance $F(m)$.

D'autre part, un mécanisme placé sous le plateau de la table et influencé à la fois par l'ordonnée y (m au dessus de la mer) et la température absolue T_y fournit, par matérialisation exacte de l'équation barométrique

$$B_y = B_o e^{-\int dy/RT_y}$$

l'inverse de la pression barométrique à la hauteur y , soit $1/B_y$. A cet effet, un intégrateur du type à roue à cliquet¹, à avance variable proportionnelle à $1/RT_y$ (inverse $1/RT_y$ établi au moyen d'une hyperbole équilatère), réalise l'intégrale $\int dy/RT_y$ et la communique sous forme de rotation à une vis exponentielle à pas variable $e^{-\int dy/RT_y}$, dont l'écrou reçoit ainsi le déplacement $1/B_y$.

Au dernier échelon, un deuxième mécanisme à triangles semblables (à la droite du tronçon de table), entièrement analogue au mécanisme donnant le rapport v/s , associe la fonction de résistance $F(m)$, l'inverse de la pression barométrique $1/B_y$ et le coefficient de forme, ajusté initialement à la main en combinaison C_{no}/B_{no} , de manière à construire la résistance de l'air q m/s^2 comme triple produit :

$$q = \frac{C_{no}}{B_{no}} \cdot \frac{1}{1/B_y} \cdot F(m) = C_{no} \cdot \frac{B_y}{B_{no}} \cdot F(m).$$

Pour le tir des fusées, l'accélération de la fusée est à appliquer selon la tangente à la trajectoire en sens opposé à la décélération q de la résistance de l'air, et à faire varier en fonction du temps jusqu'à la fin de la combustion du carburant. De même aussi le coefficient balistique C_{no}/B_{no} , qui contient le poids de la fusée, va en diminuant au fur et à mesure de la combustion. Il a été prévu — bien que pas encore réalisé

¹ Très employé dans les débitmètres intégrants pour fluides. La roue de l'échappement à ancre des horloges et montres représente la réalisation la plus élémentaire de ce principe (ici le cliquet = ancre est à avance constante).

dans l'appareil de cette description — d'introduire dans l'intégrateur ces deux corrections variables de façon semi-automatique (deuxième opérateur influençant à la main les facteurs C_{no}/B_{no} et q d'après une table de valeurs à entrée temps).

b) *Mécanisme d'intégration.*

Les quatre intégrateurs du tronçon de table intermédiaire sont numérotés en correspondance aux équations balistiques fondamentales (1) à (4). Ce sont des intégrateurs à bille du type Hele Shaw-Amsler¹ dans lesquels la fonction à intégrer doit, comme on sait, revêtir la forme d'une tangente trigonométrique ($I = \int \Phi(t) dt = \int \text{constte. } \operatorname{tg} \psi dt$).

Tous les quatre ont leur entrée en dt actionnée en fonction du temps par un petit moteur électrique central.

(1) *Intégrateur des v .* Intégration à effectuer :

$$v = - \int (q + g \sin \theta) dt$$

Pour la commodité du changement d'échelles, l'intégrale ci-dessus est scindée en deux intégrales partielles $- \int q. dt$ et $- \int g \sin \theta. dt$ qui sont évaluées individuellement. La résistance de l'air q arrivant de gauche est introduite comme fonction à intégrer dans l'intégrateur N° 1a. La composante $g \sin \theta$ de la gravité, réalisée à l'aide d'un mécanisme manivelle-coulisse de rayon g et d'angle de manivelle θ (pris à la sortie de l'intégrateur N° 2) va à l'intégrateur N° 1b. Les sorties des intégrateurs N° 1a et 1b sont totalisées par un dispositif d'addition (en principe analogue au différentiel du pont arrière des automobiles). Leur somme, $- \int (q + g \sin \theta) dt = v$ part à l'arbre central des v (fig. 5, à gauche en haut).

¹ Pour la théorie, voir par exemple :

— « Bulletin technique de la Suisse romande », 16 février 1924, p. 38-42,
A. J. Amsler & Cie. *Le wagon dynamomètre et ses derniers perfectionnements*.
— « Revue Générale des Chemins de Fer », avril 1950, p. 161-167 G. BOHL :
Appareil S.N.C.F./Amsler à tracer les horaires des trains.
— « Neue Zürcher Zeitung », Beilage *Technik*, 16 janvier 1952, feuille 6,
N° 109, Th. ERISMANN : *Alte und neue mechanische Integriergeräte*.

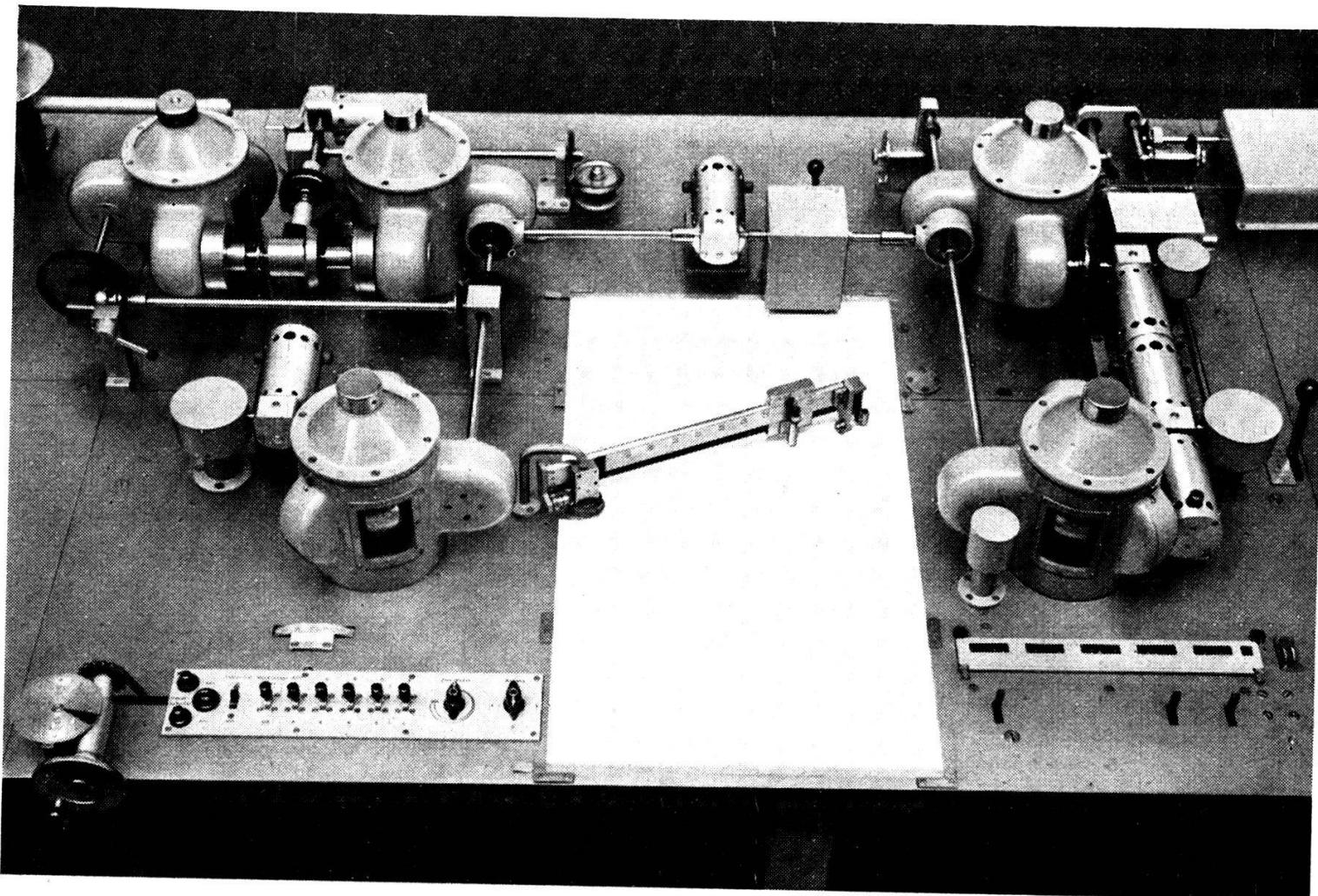


FIG. 5. — Grand intégraphe, vue de devant au milieu.

(2) *Intégrateur des θ .* Intégration à effectuer :

$$\delta = - \int \frac{g \cos \theta}{v} dt$$

La composante $g \cos \theta$ est réalisée analogiquement à l'intégrateur N° 1b à l'aide d'un mécanisme manivelle-coulisse de rayon g et d'angle de manivelle θ , mais ici à phase cosinus au lieu de sinus comme au N° 1b.

Un triangle rectangle de base v (prélevée à la sortie de l'intégrateur N° 1) et de hauteur transversale $g \cos \theta$ (venant du mécanisme manivelle-coulisse) détermine un angle à la base dont la \tg trigonométrique est égale au rapport $g \cos \theta/v$; cette dernière est introduite comme fonction à intégrer dans l'intégrateur N° 2 (fig. 5, à gauche en bas).

(3) et (4) *Intégrateurs des x et des y .* Intégrations à effectuer :

$$x = \int v \cos \theta dt ; y = \int v \sin \theta dt$$

Les grandeurs de sortie θ , respectivement v , des intégrateurs N° 1 et N° 2 sont transmises aux deux arbres centraux des v et des θ traversant la table intermédiaire dans son axe de symétrie longitudinal. Ces arbres actionnent conjointement un mécanisme à $v \cos \theta$ et $v \sin \theta$, dans lequel la vitesse v est portée comme rayon vecteur sur un bras mobile d'azimuth θ . Les coordonnées rectangulaires $v \cos \theta$ et $v \sin \theta$ de l'extrémité du vecteur v sont palpées dans deux directions perpendiculaires par des coulisses rectilignes dont les déplacements transversaux entrent comme integranda dans les intégrateurs des x et des y (N° 3 et N° 4, fig. 5 à droite).

Les mécanismes manivelle-coulisse donnant les composantes $g \sin \theta$ (intégrateur N° 1b) et $g \cos \theta$ (intégrateur N° 2) de la gravité, le mécanisme à division $g \cos \theta/v$ de l'intégrateur N° 2, enfin les mécanismes à $v \cos \theta$ et $v \sin \theta$ des intégrateurs N° 3 et N° 4 sont situés sous le tronçon de table intermédiaire immédiatement en dessous des intégrateurs correspondants. Il ne sont pas visibles sur la fig. 5.

c) *Mécanisme d'enregistrement et de comptage.**Hodographe.*

Des deux arbres centraux des v et des θ , des départs transversaux mènent au traceur d'hodographe disposé sur le bord antérieur du tronçon de table intermédiaire. Là, sur un bras recevant l'orientation polaire θ , un mécanisme communique à un petit chariot mobile radialement une distance à l'origine proportionnelle à v . Un style à encre solidaire du chariot trace l'hodographe $v = f(\theta)$ sur une feuille de papier fixée sur la table en dessous de lui (fig. 5, bas, milieu).

Trajectoire.

A la partie arrière du tronçon de table de droite, une roue à picots commandée par l'intégrateur № 3 entraîne, par l'intermédiaire d'un ruban d'acier perforé sans fin, un chariot guidé longitudinalement en direction des x d'une longueur proportionnelle à x .

Le long d'un bras transversal (c'est-à-dire à direction y) du chariot des x se déplace un curseur portant le style inscripteur des y . Ce curseur reçoit son mouvement via un deuxième ruban d'acier sans fin d'une poulie à gorge, dont la couronne dentée engrène avec un long cylindre rayé courant parallèlement aux guides du chariot des x et prenant de l'intégrateur № 4 une rotation proportionnelle à y . Le style trace ainsi sur une feuille de papier tendue sur la table la trajectoire $y = f(x)$.

Des marqueurs électromagnétiques adaptés au bras de l'hodographe et au chariot des x , et recevant des impulsions de courant d'un contact actionné par l'arbre central des t , tracent sur le cercle de base de l'hodographe, respectivement sur l'axe des x , des marques de temps à intervalles réguliers de secondes.

Comptage.

Le groupe des compteurs, disposé en avant et à la droite du tronçon de table intermédiaire, reçoit les valeurs simulta-

nées de t , θ , v , x et y directement de l'arbre des t et des arbres de sortie des intégrateurs des θ , v , x et y par l'intermédiaire d'arbres transversaux et d'engrenages.

La camera cinématographique est fixée à une colonne verticale et surplombe le groupe des compteurs. Les impulsions de courant provoquant l'ouverture de l'obturateur et l'avance du film sont lancées à intervalles équidistants de t , x ou y par des contacts apportés aux arbres des t , x et y .

d) *Auxiliaires électriques.*

En vue de l'obtention de couples actifs suffisants, les accroissements de v , θ , x et y émanant des intégrateurs sont communiqués aux maîtres-arbres par l'intermédiaire de servomoteurs amplidynes. L'installation est alimentée par du courant alternatif de lumière à 220 V, 50 \sim redressé. Le pilotage des moteurs des amplidynes est assuré par tubes électroniques à grilles influencées par des contacts rotatifs à la sortie des intégrateurs.

Les transformateurs, redresseurs à oxymétal et leurs selfs et condensateurs d'égalisation, enfin les tubes électroniques, groupés en plusieurs blocs indépendants à châssis individuel, sont réunis sur une étagère en dessous du tronçon de table de gauche.

* * *

L'intégraphe balistique décrit ci-dessus a été conçu jusqu'à et y compris le schéma fonctionnel par le premier des auteurs, le mécanisme de résistance de l'air par le deuxième. La machine a été fabriquée d'après les projets constructifs du deuxième auteur par les ateliers de construction Alfred J. Amsler & Cie à Schaffhouse.

Colonel P. CURTI.

Ancien directeur
de la Section militaire
de l'E.P.F., Zurich.

Plt. Fr. DUBOIS.

Ingénieur,
Schaffhouse.