

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 83 (1957)
Heft: 18

Artikel: Quelques applications de la servo-technique et des calculateurs analogiques dans la défense antiaérienne
Autor: Ambrosini, L.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-62795>

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: 15.07.2025

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

Annexe

Equations du réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique en marche isolée

Le comportement du réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique peut être caractérisé par un système de six équations différentielles¹:

$$\text{Equation des masses tournantes } T_a \frac{dn}{dt} + m_e = m_t.$$

$$\text{Equation du couple moteur } m_t = 1 + \frac{3}{2} h + n \operatorname{tg} \alpha_t.$$

$$\text{Equation de la surpression } h = \Theta \left(\frac{dl}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dh}{dt} \right).$$

$$\text{Equation du couple résistant } m_e = n \operatorname{tg} \alpha_e + k.$$

$$\text{Equation du dispositif de réglage } \frac{dl}{dt} = - \left(b \frac{dn}{dt} + \frac{1}{T_r} \right).$$

Avec n = variation relative de la vitesse,

l = variation relative de l'ouverture de la turbine,

m_t = variation relative du couple moteur,

m_e = variation relative du couple résistant,

h = variation relative de la pression,

k = variation relative de la charge débitée par le générateur,

T_a = constante d'accélération du groupe

$$= \frac{PD^2 n_r^2}{366 N} \text{ (s)},$$

PD^2 en tm^2 ,

N = puissance nominale du groupe (kW),

n_r = vitesse angulaire (t/mn),

Θ = chiffre caractéristique de la conduite

$$= \frac{L v_n}{g H_o} \text{ (s)},$$

L = longueur de la conduite forcée (m),

v_n = vitesse de l'eau dans la conduite forcée (m/s),

H_o = hauteur statique du plan d'eau (m),

g = constante d'accélération (m/s^2),

T_r = constante de temps du dispositif de réglage,

b = facteur de stabilisation,

$\operatorname{tg} \alpha_e$ = augmentation relative des couples résistants en fonction de la vitesse,

$\operatorname{tg} \alpha_t$ = diminution relative du couple moteur en fonction de la vitesse.

La résolution de ce système d'équations différentielles s'effectue le plus commodément en faisant usage du calcul opérationnel: en remplaçant le signe de différenciation $\frac{d}{dt}$ par l'opérateur p on obtient un système de cinq équations algébriques à cinq inconnues.

¹ Voir « Amélioration de la tenue de la fréquence dans un réseau alimenté par une centrale hydro-électrique » M. Cuénod et J. Wahl. Bull. techn. de la Suisse Rom. 20 mars et 3 avril 1954.

$$p T_a n + m_e = m_t;$$

$$m_t = 1 + \frac{3}{2} h + n \operatorname{tg} \alpha_t;$$

$$h = -\Theta \left(pl + \frac{1}{2} ph \right);$$

$$m_e = n \operatorname{tg} \alpha_e + k;$$

$$pl = - \left(bpn + \frac{1}{T_r} \right).$$

Nous éliminons les différentes variables et en déduisons les fonctions de transfert et réponses indicielles suivantes:

pour la conduite forcée:

$$\Phi_{lh}(p) = \frac{h}{l} = - \frac{3 p T_c}{1 + p T_c}; \quad \Phi_{lh}(t) = -3e^{-\frac{t}{T_c}}$$

avec $T_c = \frac{\Theta}{2}$ = constante de temps de la conduite forcée;

pour la turbine:

$$\Phi_{lm_t}(p) = \frac{m_t}{l} = \frac{1 - 2 p T_c}{1 + p T_c}; \quad \Phi_{lm_t}(t) = 1 - 3e^{-\frac{t}{T_c}}$$

pour le générateur:

$$\Phi_{m_e n}(p) = \frac{n}{m_t} = \Phi_{kn} = \frac{h}{k} = \frac{1}{p T_a + a};$$

$$\Phi_{m_e n}(t) = \Phi_{kn}(t) = \frac{1}{a} \left(1 - e^{-\frac{at}{T_a}} \right)$$

avec a = coefficient d'autorégulation = $\operatorname{tg} \alpha_e - \operatorname{tg} \alpha_m$

pour le dispositif de réglage:

$$\Phi_{nl}(p) = \frac{l}{n} = - \left(b + \frac{1}{p T_r} \right); \quad \Phi_{nl}(t) = - \left(b + \frac{t}{T_r} \right).$$

La fonction de transfert de l'ensemble du circuit de réglage est donnée par le produit des fonctions de transfert partielles:

$$\Phi_{nn}(t) = \Phi_{nl} \cdot \Phi_{lm_t} \cdot \Phi_{m_e n} = - \left(b + \frac{1}{p T_r} \right) \cdot \frac{1 - 2 p T_c}{1 + p T_c} \cdot \frac{1}{p T_a + a}.$$

En remplaçant l'opérateur p par $j\omega$ dans cette expression, on obtient immédiatement la réponse harmonique $G_{nn}(\omega)$ du circuit de réglage ouvert:

$$G_{nn}(\omega) = - \left(b + \frac{1}{j\omega T_r} \right) \cdot \frac{1 - 2 j\omega T_c}{1 + j\omega T_c} \cdot \frac{1}{j\omega T_a + a}.$$

QUELQUES APPLICATIONS DE LA SERVO-TECHNIQUE ET DES CALCULATEURS ANALOGIQUES DANS LA DÉFENSE ANTIAÉRIENNE

par L. AMBROSINI, Ingénieur dipl. E.P.F. Zurich, à Genève¹

1. Introduction

La science actuelle des servo-mécanismes et des calculateurs est redevable, malheureusement dans une proportion importante, aux efforts déployés dans le domaine militaire pendant et après la deuxième guerre

¹ Conférence tenue le 7 décembre 1956 au 1^{er} Congrès de l'ASPA, à Zurich.

mondiale. Devant les nécessités militaires, des crédits importants ont été utilisés, ayant comme conséquence la collaboration à grande échelle d'ingénieurs de toute première valeur, et la spécialisation de techniques nouvelles, aujourd'hui utilisables dans de nombreux secteurs de l'industrie, notamment dans l'automatique de production.

Que l'on parle de radars, directeurs de tir, télécommandes d'armes, pilotes automatiques, projectiles téléguidés, moteurs atomiques, ces branches ne sont plus concevables sans l'utilisation des servo-mécanismes et calculateurs les plus perfectionnés. Les termes de synchros, amplificateurs d'asservissement, servo-moteurs, resolver, aussi bien que linéarité, constantes de temps, diagrammes de Nyquist et de Bode, sont devenus le langage quotidien de nombre d'ingénieurs militaires.

En parlant de la défense antiaérienne en particulier, qui est une des applications les plus délicates et coûteuses, le problème qui se pose à l'ingénieur est de réaliser des ensembles capables de diriger un moyen de destruction aussi près que possible d'un engin ennemi qui se rapproche, et de le détruire par une explosion déclenchée par contact ou proximité. Il s'agira d'enregistrer les caractéristiques de position présente et de vol avec précision, et de déterminer la trajectoire du moyen de destruction, afin qu'il puisse rencontrer la cible après un temps T_f , nécessaire pour parcourir la distance qui le sépare d'elle.

Nous pouvons lancer des obus, ou roquettes, non guidés, sur lesquels, une fois lancés, nous ne pouvons plus corriger la trajectoire, et dont, par conséquent, le point futur de rencontre devra être calculé avec une extrême précision.

Nous pouvons lancer des projectiles téléguidés, dont on corrigera le vol en contrôlant d'une façon continue la position par rapport à la cible, ainsi que des projectiles autoguidés, capables de détecter automatiquement leurs erreurs, selon un système de « homing », et de corriger eux-mêmes leur trajectoire.

Le cas extrême des exigences demandées aux servo-mécanismes se rencontre dans le développement de projectiles autoguidés contre projectiles intercontinentaux autopositionneurs qu'ils devront dépasser en rapidité et précision, développement qui prend une grande importance actuellement et qui était techniquement irréalisable il y a encore peu de temps.

Traitant des canons antiaériens, qui, désormais, ne sont plus envisagés qu'automatiques, et fournissant une haute cadence de tir, il faudra assurer leur position correcte d'une façon continue, de façon que chaque obus quittant l'arme à n'importe quel instant pendant le

tir, suive une trajectoire juste. Les fautes permises ne doivent pas dépasser quelques millièmes de radian, c'est-à-dire être inférieures, si possible, à la dispersion d'armes tirant en rafale. Les vitesses angulaires de poursuite peuvent atteindre, par exemple, pour un avion volant à 300 m/s à 300 m de distance, 1 radian/s [57°/s].

On se rend compte de la linéarité exigée aux composants, de l'importance des constantes de temps des mouvements transitoires après l'acquisition d'une cible, de l'effet désastreux de toute oscillation parasite, ainsi que de l'influence des constantes de vitesse et d'accélération, c'est-à-dire des retards dynamiques entre éléments. Les jeux statiques sont, d'autre part, une source essentielle d'oscillations entretenues.

2. Eléments du problème

Sans aborder des techniques ou tactiques militaires, nous voudrions montrer, par quelques exemples, comment les théories modernes des servo-mécanismes s'appliquent, permettant l'analyse correcte de systèmes de fonctionnement, dont la connaissance était auparavant incomplète.

Pour simplifier, nous n'examinerons des exemples que dans deux dimensions, au lieu de trois, et nous envisagerons un avion volant en ligne droite. Le plan constitué par la trajectoire rectiligne de l'avion et l'arme est ce que nous appelons *plan alaire*. Nous admettons, en plus, que le centre de pivotement de la ligne de visée se confond avec celui de l'arme.

En partant de la ligne de visée OP (fig. 1), assurée optiquement ou par radar, nous devons donner à l'arme une avance γ , ou prévision, en nous servant, pour la calculer, des éléments à notre disposition, tel l'angle de visée $\alpha(t)$ et la $r(t)$, fonctions variables par rapport au temps. Essentiellement, nous pourrions nous servir de leurs valeurs momentanées, ainsi que de leurs dérivées premières.

Sur la trajectoire de l'avion (fig. 1) sont reportés trois points, à savoir $P_0(x_0, y_0)$, puis $P(x, y)$, point arbitraire de coordonnées polaires r, α , et $F(r_f, \alpha_f)$.

Le viseur est dans la ligne OP et l'affût s'en écarte de l'angle γ

$$\text{soit} \quad y = r \sin \alpha \quad \text{et} \quad x = r \cos \alpha \quad (1)$$

$$\text{et} \quad \alpha_f = \alpha + \gamma. \quad (2)$$

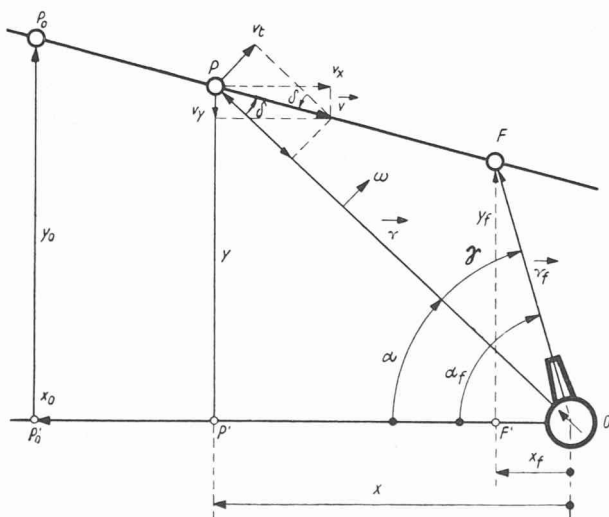


Fig. 1. — Coordonnées.

P = Point de mesure des caractéristiques de vol.

P_0 = Etat initial arbitraire (coord. x_0, y_0).

$OP = r$ = éloignement momentané.

$OF = r_f$ = éloignement du point de rencontre F .

α = Angle de visée.

γ = Angle de prévision.

$\alpha_f = \alpha + \gamma$ = Angle de tir.

$\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ = Vitesse angulaire.

x, y = Coordonnées cartésiennes de P .

x_f, y_f = Coordonnées cartésiennes de F .

$\vec{v}$ = Vitesse de l'avion en P .

$v_t = v \sin \delta = \gamma \omega$ = vitesse tangentielle.

$v_x = \frac{dx}{dt}$ = Composante horizontale de $\vec{v}$.

$v_y = \frac{dy}{dt}$ = Composante verticale de $\vec{v}$.

Si v_m est la vitesse moyenne du projectile le long de la trajectoire de vol OF , on a

$$r_f = v_m \cdot T_f$$

(T = temps de vol et $OF = r_f$).

La figure 2 montre d'une façon générale le temps de vol T nécessaire pour parcourir la distance r . Dans le cas où la vitesse à l'orifice (vitesse initiale) v_o pourrait être maintenue constante, T serait donné par la droite 1. En réalité T diminue selon la courbe 3, car la vitesse du projectile v_p varie à cause de la résistance de l'air, ce qui nous permet de définir, en fonction de la courbe 2, une vitesse moyenne v_m . Le temps de vol T est déterminé en fonction de r , d'une manière purement empirique.

Nous tirons, de la figure 1, la distance

$$PF = v T_f \quad (3)$$

où v = vitesse de l'avion.

La vitesse angulaire de rotation du viseur vaut

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} \quad (4)$$

d'où l'on obtient la composante tangentielle

$$v_t = v \sin \delta = r\omega.$$

L'emploi de la trigonométrie au triangle PFO donne

$$\frac{\sin \gamma}{\sin \delta} = \frac{PF}{FO} = \frac{v T_f}{r_f}$$

et

$$\sin r = \omega T_f \frac{r}{r_f} \quad (5)$$

Appelons T le temps de vol du projectile pour parcourir la distance OP , nous obtenons alors

$$r = v_m \cdot T.$$

Pour des avions, dont les objectifs sont proches des armes de défense, on peut poser approximativement

$$r = v_m T \quad r_f = v_m T_f \quad \sin \gamma \approx \gamma$$

et selon (5)

$$\gamma \approx \omega T, \quad (6)$$

résultat que l'on peut directement lire sur la figure 1, c'est-à-dire que nous obtenons, comme loi générale approximative de la prévision γ , le produit de la vitesse angulaire de l'angle de visée par le temps T correspondant à la distance présente. Il en découle que l'on peut construire des calculateurs de tir relativement simples utilisant cette relation comme principe de départ, ce qui se fait effectivement, en introduisant des facteurs de correction mathématiques pour en améliorer la précision.

Cette classe de calculateurs à coordonnées polaires r, α et à vitesse angulaire ω pourra utiliser, pour ses éléments, les principes physiques les plus divers, intégrateurs mécaniques, gyroscopes, dynamos tachymétriques, dérivateurs électroniques, etc.

Nous déterminons d'abord le temps de vol T , d'après une fonction empirique $T(r)$ [facteur de transmission 1]; pareillement pour la vitesse angulaire $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$, d'après la variation de l'angle α [facteur de transmission 2].

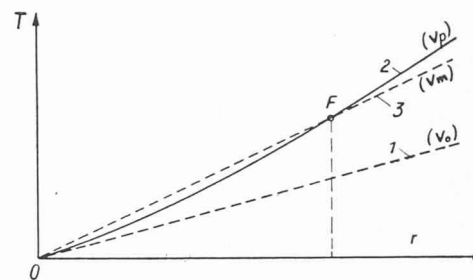


Fig. 2. — Temps de vol T d'un projectile en fonction du chemin r .

r = Chemin parcouru.

T = Temps de vol correspondant.

Courbe 1: Cas où la vitesse de vol serait égale à la vitesse initiale.

Courbe 2: Allure réelle de T lors d'une vitesse du projectile v_p variable.

Droite 3: Linéarisation pour la vitesse moyenne v_m .

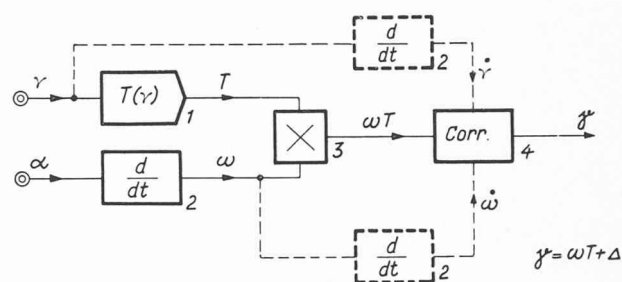


Fig. 3. — Schéma mathématique simplifié de la figure 1.

Symbole 1 = Calcul du temps de vol T à la distance r .

Symbole 2 = Différentiation.

Symbole 3 = Multiplication.

Symbole 4 = Facteur de correction pour le calcul de γ d'après ωT , $\dot{r}$ et $\dot{\omega}$.

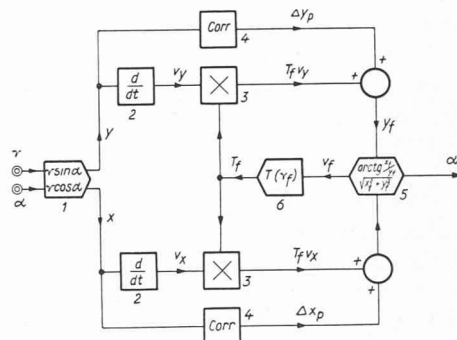


Fig. 4. — Schéma mathématique lors de l'emploi de coordonnées cartésiennes.

1 = Résolveur, calcule $x = r \cos \alpha$ et $y = r \sin \alpha$.

2 = Différentiateur.

3 = Multiplicateur.

4 = Facteur de correction de la parallaxe.

5 = Résolveur, calcule $r_f = \sqrt{x_f^2 + y_f^2}$ et $\alpha_f = \arctg \frac{y_f}{x_f}$.

6 = Calcul du temps de vol T_f d'après r_f .

L'élément de calcul 3 forme le produit $\omega T = \gamma$, ce qui donne en première approximation l'angle de prévision γ . Le facteur de correction 4 calcule une valeur plus précise de γ en considérant la variation de la distance $\frac{dr}{dt}$ en fonction du temps, ainsi que celle de l'accélération angulaire $\frac{d\omega}{dt}$ (fig. 3.)

Quand le prix de l'installation le justifie, on pourra, par contre, résoudre exactement la triangulation géométrique, en utilisant la décomposition des vecteurs position et vitesse de l'avion dans un système de coordonnées cartésiennes, avec l'avantage d'une stabilisation du calcul vitesse sur des valeurs constantes, c'est-à-dire des vitesses linéaires invariantes v_x resp. v_y pour des caractéristiques identiques de vol. L'ensemble est réalisable aisément dans un calculateur analogique, disposant des éléments non linéaires adéquats, comme $\sin x$, $\cos x$.

Utilisons dans la figure 1 des coordonnées cartésiennes x et y , et admettons que le centre de pivotement de la ligne de visée coïncide pour commencer avec le centre de pivotement de l'arme.

De la figure 1, découle dans le cas d'une vitesse v de l'avion constante :

$$y_f = y - v_y \cdot T_f \quad (v_y = \text{const}) \quad (7a)$$

$$x_f = x - v_x \cdot T_f \quad (v_x = \text{const}) \quad (7b)$$

$$r_f = \sqrt{x_f^2 + y_f^2} \quad (7c)$$

$$T_f = \text{fonction de } r_f. \quad (7d)$$

La réalisation pourra s'effectuer selon le schéma mathématique de la fig. 4 avec des principes physiques divers de multiplication et de dérivation de grandeurs. Le schéma se prêtera à l'introduction d'une parallaxe entre le centre de la ligne de visée et celui de l'arme, comme indiqué en pointillé, par simple adjonction des écarts des coordonnées des deux centres, fixant les deux termes correctifs pos. 4 pour Δx_p et Δy_p .

On pourra aussi utiliser ce principe pour le fonctionnement en pilotage automatique, c'est-à-dire qu'une fois les caractéristiques de position initiale et de vol de l'avion acquises, et le calculateur stabilisé après cette acquisition transitoire, on pourra contrôler la position de l'arme par mémoire en se passant des grandeurs d'entrée α_v et $D_{\text{prés.}}$, permettant ainsi à un radar de rechercher un autre avion adverse. On pourra aussi, si on le souhaite, utiliser la différence entre l'angle de visée réel et celui calculé pour la commande de l'ensemble, avec une forte amélioration du pointage, l'opérateur visuel ou le radar n'ayant plus qu'à corriger des écarts minimes entre l'observation et la grandeur calculée. La fig. 5 montre la liaison des opérations mathématiques correspondantes.

Si le temps t s'écoule en passant du point P_o (fig. 1) à P , on a :

$$x = x_o - v_x t \quad (8a)$$

$$y = y_o - v_y t. \quad (8b)$$

Il s'agira d'utiliser l'écart $\Delta\alpha$, qui pourra se créer, en le réintroduisant dans le circuit, au moyen d'un asservissement idoine.

Nous pouvons regarder maintenant comment les théories des servo-mécanismes trouvent leur application dans le domaine, notamment du point de vue stabilité d'un ensemble.

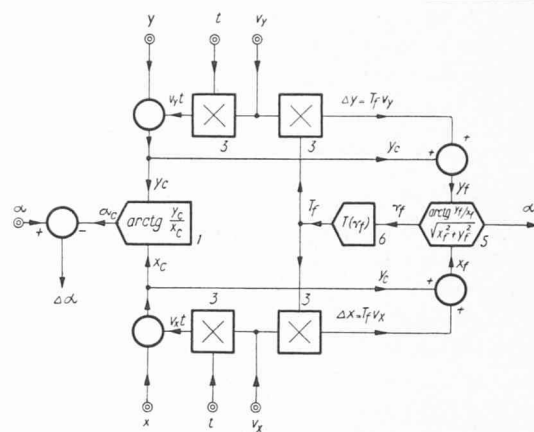


Fig. 5. — Schéma mathématique pour la poursuite automatique.

t , α , x , v_x , y et v_y = grandeurs d'entrée.

1 = Résolveur, calcule $\alpha_c = \arctg \frac{y_c}{x_c}$.

3 = Multiplicateur.

5 = Résolveur, calcule $r_f = \sqrt{x_f^2 + y_f^2}$ et $\alpha_f = \arctg \frac{y_f}{x_f}$.

6 = Calcul du temps de vol T_f d'après r_f .

c = Valeur calculée.

$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_c$, correction.

3. Examen de la stabilité à l'aide des critères connus de stabilité

On peut en effet considérer que la ligne de visée d'un dispositif de pointage constitue la grandeur d'entrée d'un servo-mécanisme, pendant que la ligne de tir de l'arme en constitue la grandeur de sortie. Nous pouvons ainsi appliquer à la grandeur d'entrée α les perturbations classiques de la servo-technique, sous forme d'impulsions unitaires de Dirac, échelon unitaire, fréquence d'oscillation, etc., aussi bien que cela est appliqué dans les amplificateurs électroniques isolés, et étudier comment la position de l'arme est influencée par ces perturbations et les réglages que nous pouvons effectuer dans le système.

Ces perturbations correspondent aux perturbations réelles dans la pratique. Notamment (fig. 6 et 7), un échelon unitaire correspond à l'acquisition d'un objectif à partir d'une position initiale de repos, un échelon de vitesse à la poursuite réelle de l'avion, une impulsion unitaire à un écart momentané unilatéral de pointage, et le critère de fréquence de réponse à la connaissance de l'oscillation de l'angle de l'arme en fonction d'une certaine fréquence d'oscillation de la ligne de visée, toujours existante.

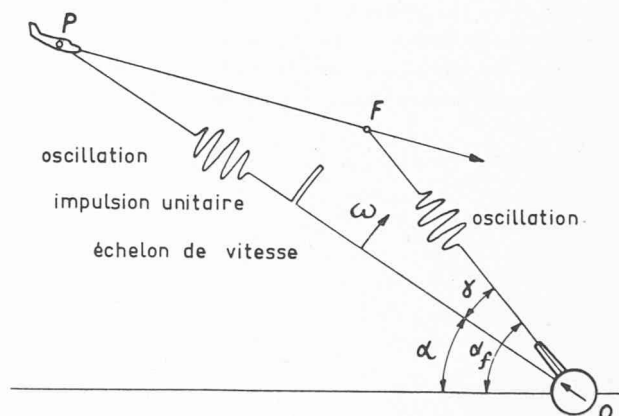


Fig. 6.

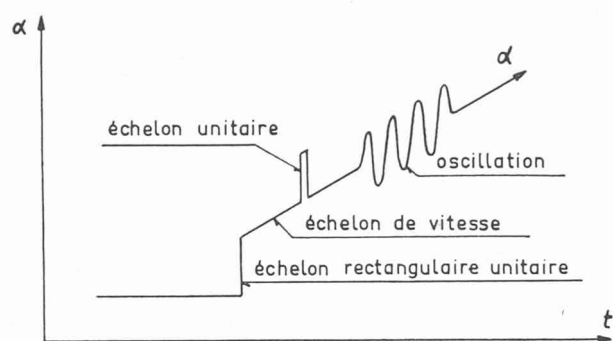


Fig. 7.

Pour montrer comment les mathématiques opérationnelles s'appliquent, nous pouvons prendre le cas d'un simple viseur, placé solidaire d'une arme avec son boîtier. Il devra nous fournir, au moyen d'un décalage angulaire d'un organe de visée tel un collimateur, l'angle de prévision recherché (fig. 8).

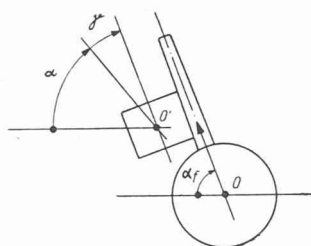


Fig. 8.

La tachymétrie de la vitesse angulaire pourra s'effectuer en utilisant la rotation de l'arme, avec des éléments électriques, mécaniques ou gyroscopiques. Notamment, à la fin de la guerre, on trouvait des dynamos tachymétriques dans la D.C.A. allemande, des intégrateurs mécaniques dans les tourelles des bombardiers américains, des gyroscopes dans les viseurs d'avions, et l'on retrouve encore ces éléments combinés plus ou moins avec le développement actuel de l'électronique.

Prenons un intégrateur mécanique, élément très connu, toujours employé grâce à sa linéarité qui dépasse facilement 0,1 %, et qui, avec une contre-réaction, nous mesurera la vitesse angulaire (fig. 10).

La fig. 8 montre un système à ligne de visée dépendante de la position de l'arme, qui est utilisé en raison de la simplicité de l'exemple, au lieu d'une ligne de visée indépendante.

La figure 9 montre le schéma mécanique et la figure 10 les éléments pareillement numérotés, dans le schéma mathématique; on remarque en particulier le différentiel 2 et l'intégrateur 3.

Nous aurions pu, tout aussi bien, si la position de l'arme était fournie sous forme de tension électrique, employer un système électronique, de préférence un élément dérivateur à un élément intégrateur dans ce cas (fig. 12).

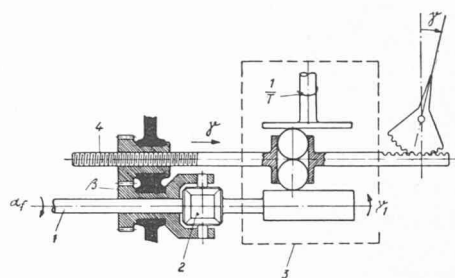


Fig. 9. — Principe mécanique du viseur.

- 1 = Arbre d'entraînement α_f .
- 2 = Différentiel $\beta = \alpha_f - \gamma_1$.
- 3 = Intégrateur mécanique $\gamma_1 = \int \frac{\gamma dt}{T}$.
- 4 = Réduction $\beta R = \gamma$.
- γ_1 = Angle de rotation à la sortie de l'intégrateur.
- β = Angle de rotation du différentiel.
- $\frac{1}{T}$ = Vitesse angulaire de l'intégrateur.

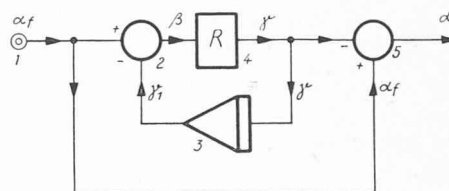
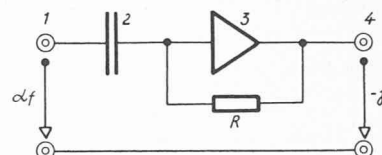


Fig. 10. — Schéma mathématique de la figure 9.

- 1 = Angle d'entrée α_f .
- 2 = Différentiel $\beta = \alpha_f - \gamma_1$.
- 3 = Intégrateur mécanique $\gamma_1 = \int \frac{\gamma dt}{T}$.
- 4 = Réduction $\beta R = \gamma$.
- 5 = Différentiel $\alpha = \alpha_f - \gamma$.

Fig. 11. — Schéma électrique pour la formation de γ à partir d' α_f .

- 1 = Angle d'entrée α_f .
- 2 = Condensateur.
- 3 = Amplificateur avec résistance en parallèle.
- 4 = Angle de sortie ($-\gamma$).

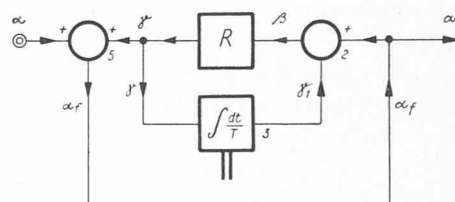


Fig. 12. — Inversion du schéma mathématique de la figure 10.

- α = Angle d'entrée.
- α_f = Angle de sortie.
- 3 = Intégrateur $\gamma_1 = \int \frac{\gamma dt}{T}$.
- 2 = Différentiel $\beta = \alpha_f - \gamma_1$.
- 5 = Différentiel $\alpha_f = \alpha + \gamma$.

Nous imaginons que tout se déroule d'après les mouvements de la ligne de visée, c'est-à-dire le pointeur asservit l'arme, de façon telle que la ligne de visée effectue certains mouvements perturbateurs typiques, et nous étudions le fonctionnement du calculateur d'après ceux-ci. De ce fait, nous pouvons intervertir le sens de fonctionnement du système qui, d'ailleurs, dans notre cas, est effectivement convertible physiquement (fig. 12).

$$\gamma = R \left[\alpha_f - \frac{1}{T} \int \gamma dt \right] = R [\alpha_f - \gamma_1] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{dt} &= R \left[\frac{d\alpha_f}{dt} - \frac{\gamma}{T} \right] \\ \frac{1}{R} \cdot \frac{d\gamma}{dt} &= \frac{d\alpha_f}{dt} + \frac{d\gamma}{dt} - \frac{1}{T} \gamma \\ \left[\frac{1-R}{R} \right] \frac{d\gamma}{dt} + \frac{1}{T} \gamma &= \frac{d\alpha_f}{dt}. \end{aligned} \quad (9)$$

Nous voyons qu'après stabilisation, nous avons :

$$\lim \gamma = T \frac{d\alpha_f}{dt}. \quad (10)$$

Si nous passons au calcul opérationnel, nous obtenons la fonction de transfert du système, par introduction de $p \equiv \frac{d}{dt}$

$$\begin{aligned} \left[\frac{1-R}{R} p + \frac{1}{T} \right] \gamma(p) &= p \cdot \alpha(p) \\ (G(p)) = \frac{\gamma(p)}{\alpha(p)} &= \frac{p}{\left[\frac{1-R}{R} p + \frac{1}{T} \right]}. \end{aligned} \quad (11)$$

Pour obtenir la fonction transfert de la réponse, il suffit de multiplier la fonction de transfert isomorphe par la fonction de transfert de l'excitation E appliquée à l'entrée selon :

$$\gamma(p) = G(p) \cdot E(p). \quad (12)$$

Nous pouvons appliquer différents types de fonctions excitatrices :

Impulsion double unitaire		$E(p) \equiv p$
" " "		" = 1
Echelon		" = 1/p
" vitesse "		" = 1/p^2
" accélération "		" = 1/p^3

Appliquons le plus important, l'échelon unitaire de position $E(p) = 1/p$, correspondant donc à l'acquisition d'une cible à partir d'une position d'attente.

$$\gamma(p) = \frac{R}{p + \frac{1}{T} \left[\frac{R}{1-R} \right]}. \quad (13)$$

En effectuant la transformation inverse (fig. 14), nous obtenons la réponse indicielle :

$$\gamma(t) = \mathcal{L}^{-1}[\gamma, p] = \left[\frac{R}{1-R} \right] e^{-\left[\frac{R}{1-R} \right] \frac{1}{T} \cdot t} = \frac{T}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (14)$$

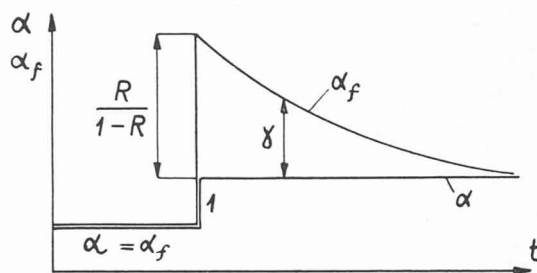


Fig. 13. — Variation de l'angle de tir α_f lors d'une variation rapide de l'angle de visée α selon un échelon rectangulaire.

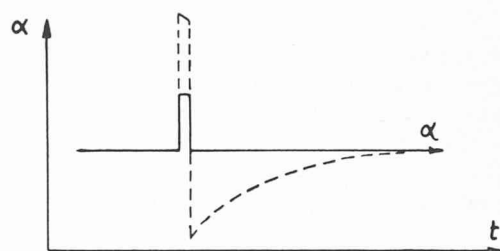


Fig. 14. — Variation de α_f (angle de tir) sous l'influence d'une impulsion de l'angle de visée α .

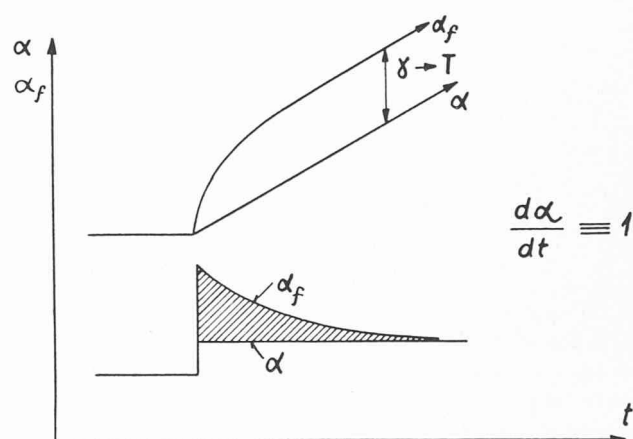


Fig. 15. — Variation de l'angle de tir α_f lors d'une variation linéaire de l'angle de visée α , ou sous l'influence d'un échelon rectangulaire.

$$\text{où } \tau = \frac{1-R}{R} \cdot T, \quad G(p) = \frac{T_p}{1 + \tau p}.$$

Nous voyons, que l'appareil est instable si $R \geq 1$, et l'importance de l'amortissement. Vu le fort écart lors de l'acquisition de la cible, nous serons obligés de l'effectuer avec calculateur débrayé, mais nous voyons aussi l'influence découlant du simple fait d'un pointeur déplaçant sa ligne de visée de l'avant à la queue de l'avion.

Si nous voulons connaître la réponse à une impulsion unitaire, c'est-à-dire à un écart unilatéral de la ligne de visée, il nous suffit d'effectuer la dérivée de la réponse indicielle (fig. 14) :

$$\gamma(t) = - \left[\frac{R}{1-R} \right]^2 \frac{1}{T} e^{-\left[\frac{R}{1-R} \right] \frac{1}{T} t}$$

Nous voyons qu'à un écart momentané latéral de α , correspond un écart de signe contraire de α_f . Pour connaître la réponse à un échelon vitesse, il suffit d'effectuer l'intégration de la réponse indicielle (fig. 15) ou de faire la décomposition opérationnelle.

$$\gamma = T \left[1 - e^{-\left[\frac{R}{1-R} \right] \frac{1}{T} t} \right].$$

L'intégration graphique devient particulièrement intéressante lorsqu'on veut connaître la réponse, non plus à un échelon vitesse unitaire, mais à une vitesse angulaire variable, tel le cas d'un calculateur à coordonnées polaires, et à un temps T fonction d'une distance variable. C'est ce qu'on appelle calcul graphique par convolution, en décomposant la fonction excitatrice en impulsions singulières. On peut ainsi connaître la réponse à toute trajectoire possible d'avions.

Si nous voulons connaître la réponse de l'angle de l'arme α_f à une oscillation entretenue de l'angle de visée α , nous pouvons utiliser l'analyse harmonique, ce qui correspond à $p = j\omega$, faisant passer $G(p)$ en $G(j\omega)$.

Cette analyse est de toute première importance, l'angle de visée étant toujours soumis à des perturbations entretenues, soit de la part d'un pointeur, soit de la part d'un radar fonctionnant en poursuite automatique. De fortes erreurs de tir proviennent souvent de la non-observation de cette analyse.

Elle nous permet d'autre part de passer à l'examen de la stabilité d'un ensemble calculateur, sans rechercher les racines des équations différentielles, par critère de Nyquist, ainsi qu'à l'examen de la stabilité d'une télécommande, par critère de Bode.

Reprenant notre exemple :

$$G(j\omega) = \frac{\gamma(j\omega)}{\alpha(j\omega)} = \frac{j\omega}{\left[\frac{1-R}{R} \right] j\omega + \frac{1}{T}}.$$

Nous avons besoin de connaître la fonction de transfert de $\alpha_f(p)$ par rapport à $\gamma(p)$, la prévision étant chez nous l'erreur des servo-mécanismes, changée de signe.

$$H(p) = \frac{\alpha_f(p)}{\gamma(p)}$$

$$\gamma(p) = G(p) \cdot \alpha(p) = G(p) [\alpha_f(p) - \gamma(p)]$$

$$H(p) = 1 + \frac{1}{G(p)} = \frac{1}{R} + \frac{1}{Tp}$$

$$H(j\omega) = \frac{1}{R} + \frac{j}{\omega T} \quad (17)$$

dont nous pouvons tracer la courbe dans un plan complexe (fig. 16).

Pratiquement, on emploie couramment la transformée inverse, qui permet de mieux se rendre compte des rapports d'amplitude M entre α_f et α .

$$G_1(j\omega) = \frac{1}{H(j\omega)} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{j}{\omega T}}. \quad (18)$$

$$G_1(j\omega) = Me^{j\varphi} = \frac{\alpha_f(p)}{\alpha(p)}. \quad (19)$$

Nous y retrouvons les règles de stabilité, selon Nyquist, le point critique étant changé de signe.

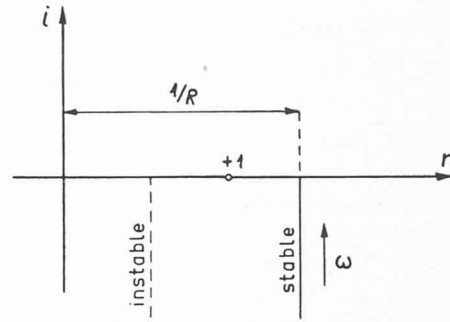


Fig. 16. — Variation de la fonction $H(j\omega)$ dans le plan complexe. ($j \sim i$)

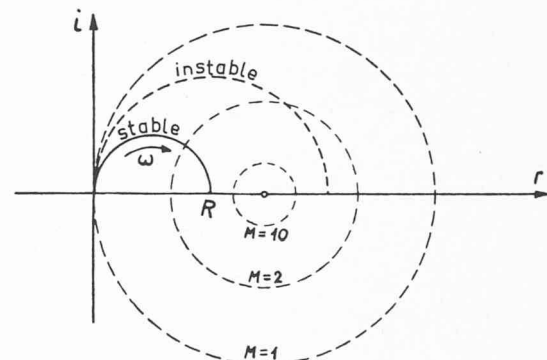


Fig. 17. — Stabilité.

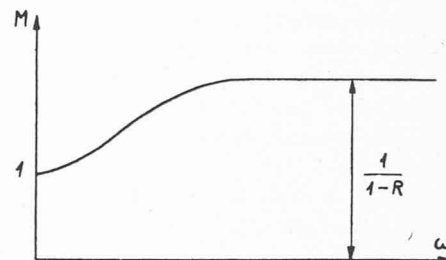


Fig. 18. — Courbe de gain

($M = \frac{\alpha_f}{\alpha}$ = rapport des amplitudes en $f(\omega)$).

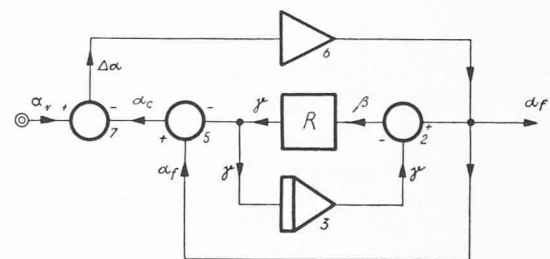


Fig. 19. — Schéma fonctionnel d'un servo-viseur.

2 = Différentiel $\beta = \alpha_f - \gamma_1$.

3 = Intégrateur $\gamma_1 = \int \frac{\gamma dt}{T}$.

5 = Différentiel $\alpha_c = \alpha_f - \gamma$.

6 = Amplificateur.

7 = Différentiel $\Delta\alpha = \alpha_r - \alpha_c$.

α_r = Ligne de visée.

α_c = Valeur calculée d' α , par l'appareil.

Nous pouvons tracer aisément le rapport des amplitudes $M = \frac{\alpha_f}{\alpha}$, en fonction de la fréquence d'oscillation (fig. 19) :

Nous avons, jusqu'à maintenant, imaginé que c'était le pointeur qui actionnait la position de l'arme pour maintenir la ligne de visée sur l'avion et qui constituait ainsi le système d'asservissement de l'ensemble. Il est plus rationnel de penser que le pointeur n'ait qu'une ligne de visée libre en main, totalement indépendante, qu'il puisse librement pivoter dans l'espace, comme des jumelles.

Il en découlera de grandes qualités de maniabilité dans l'acquisition d'une cible, ainsi que dans la précision de la poursuite, l'inertie des armes n'ayant plus de rôle dans le pointage. C'est ce type d'appareils de pointage, qui sont appelés servo-viseurs, que nous avons créés à Genève.

Si nous voulons tracer le schéma de fonctionnement d'un servo-viseur, il suffit, en principe, d'utiliser l'écart entre la ligne de visée α_r actionnée par le pointeur, et la valeur de α_c calculée par l'appareil, pour asservir le mécanisme à l'aide d'un amplificateur électrique ou hydraulique (fig. 19).

Un tel schéma de fonctionnement aurait toutefois de pauvres caractéristiques. Si nous utilisons un amplificateur à haut gain, nous aurions les défauts mentionnés précédemment pour le viseur pur, pas de maniabilité. Si nous employons un amplificateur de puissance à faible gain, nous aurions $\Delta\alpha$, comme faute de tir supplémentaire.

Il est toutefois possible, en développant des schémas plus raffinés et compliqués, d'arriver à des systèmes de servo-viseurs offrant les caractéristiques pratiques désirées qu'il sera possible d'examiner en détail, en utilisant, à plus grande échelle, les techniques que nous avons exposées.

Dans le cas de la réponse indicielle, nous serons toujours obligés de débrayer la calculatrice, et d'éviter des dépassements trop prononcés, ainsi que des réponses exponentielles trop amorties (fig. 20).

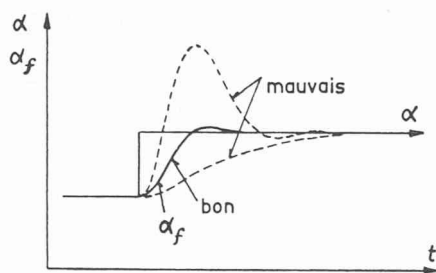


Fig. 20.

La réponse à un échelon vitesse, intégrale d'une réponse indicielle à calculateur embrayé, devra être aussi rapide que possible, tout en ne montrant aucune oscillation (fig. 21).

Le diagramme de Nyquist pourra prendre les formes les plus compliquées, en nous renseignant exactement sur la stabilité du tout, ainsi que sur le rapport $M = \frac{\alpha_f}{\alpha}$ des amplitudes d'oscillation de α et α_f (fig. 22-23).

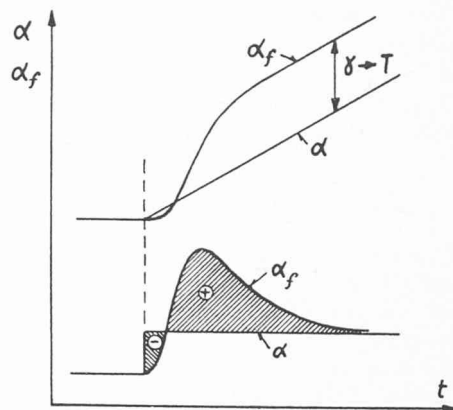
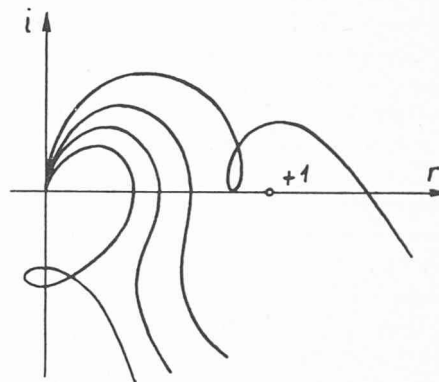
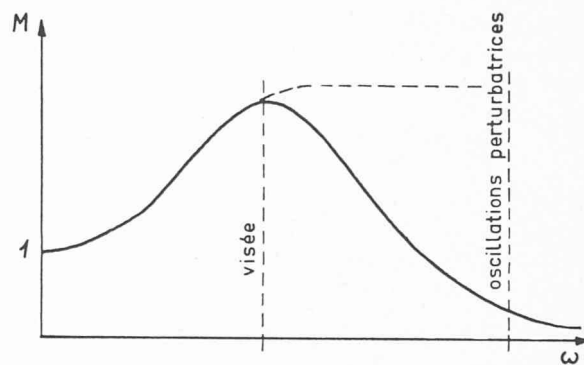
Fig. 21. — Variation de l'angle de tir α_f lors d'une variation de l'angle de visée α selon une fonction linéaire et un échelon rectangulaire.

Fig. 22. — Diagramme de Nyquist.

Fig. 23. — Courbe de gain
(rapport d'amplitudes $M = \frac{\alpha_f}{\alpha}$ entre affût et viseur).

Comme les fréquences d'oscillation de la ligne de visée seront relativement hautes, par rapport aux fréquences de pointage, il nous sera possible de maintenir un mouvement régulier de l'arme.

En superposant les différentes réponses, nous serons conduits au véritable fonctionnement dans la pratique (fig. 24-25), qui sera particulièrement délicat quand les échelons de position et vitesse auront sens contraire.

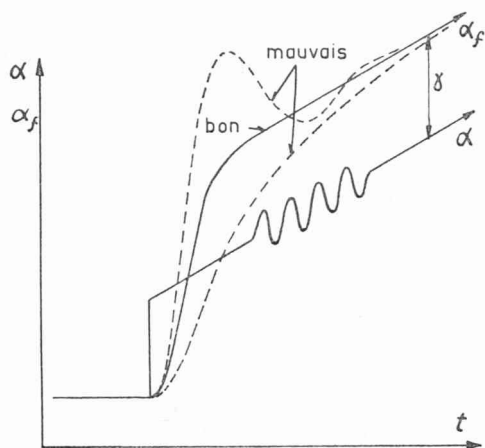


Fig. 24. — Bon et mauvais comportement des réponses de l'angle de tir.

(L'angle de tir désiré doit être obtenu le plus rapidement possible ; lors d'un amortissement trop faible, des oscillations apparaissent, tandis que dans le cas contraire, la réaction est trop tardive. Des oscillations de α selon de hautes fréquences n'influencent pas l'angle de tir α_f .)

2. Réalisations

On peut voir, dans les figures 26-28, un modèle de servo-viseur, le type HSS-709, créé et réalisé dans les usines genevoises du groupe Hispano-Suiza.

Ce modèle est de nature électro-mécanique, avec des intégrateurs mécaniques de calcul et un système hydraulique de puissance. La nature mécanique a été dictée par des conditions militaires, notamment robustesse comparable à celle des affûts sur lesquels il doit être monté, résistance aux vibrations des armes, entretien par non-spécialistes et temps de mise en route de une seconde. Cette dernière condition est impossible à atteindre avec des systèmes électroniques, vu le temps d'échauffement des cathodes des tubes ; seuls, les transistors pourront prochainement remplir cette condition.

D'ailleurs, pour résoudre un système à coordonnées cartésiennes, nous sommes obligés d'utiliser des asservissements électroniques : le grand nombre d'éléments de calcul sera tenu à un faible niveau de puissance, et nous passerons seulement à la sortie au haut niveau de puissance désiré.

Par contre, dans un calculateur à vitesse angulaire, qui n'exige qu'un nombre d'éléments de calcul bien plus réduit, la nature physique du système ne joue plus le même rôle. Des intégrateurs mécaniques, avec une puissance de sortie de plusieurs dizaines de watts, permettent de passer directement à un asservissement hydraulique de puissance, sans amplificateurs à haut gain intermédiaires.

Nous voyons, dans la photo 26, la silhouette de cet appareil, panneaux ouverts, sur un banc d'essai. La partie centrale est constituée par le calculateur, avec six intégrateurs à double bille, surmontant un bloc hydraulique de puissance. Les poignées de commande sont solidaires du collimateur reflex, selon des tringleries intérieures munies intégralement de rattrapages

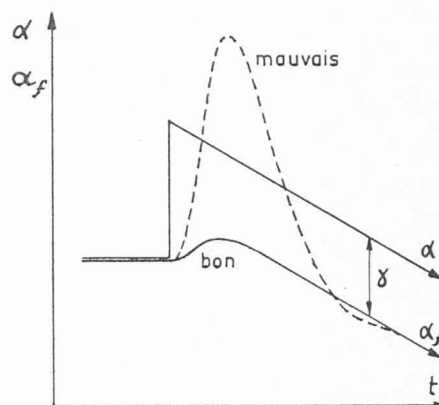


Fig. 25. — Si le mouvement de poursuite est contraire au mouvement d'approche on atteint plus rapidement une position de tir correcte, si, pendant le mouvement d'approche on a déclenché le calcul de la prévision γ (ligne pleine).

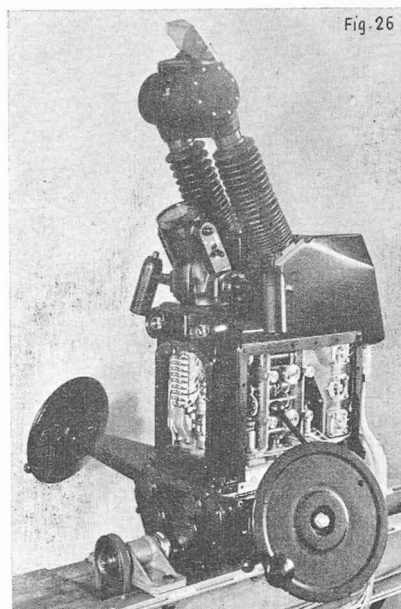


Fig. 26. — Servo-viseur au banc d'essai.

de jeu. La partie supérieure du boîtier est occupée par les éléments synchros destinés à relier le servo-viseur à tout appareillage extérieur donnant la distance, tel un radar.

La figure 27 montre le calculateur nu et la figure 28, un affût HSS-635, muni de trois canons automatiques de 20 mm et d'un servo-viseur. Poids du tout : 1150 kg pour une puissance de feu à la bouche de 5600 ch.

La caractéristique principale de l'ensemble est le fait, déjà mentionné, que la seule servitude exigée du pointeur est de placer le point central lumineux du collimateur, c'est-à-dire la ligne de visée, sur l'avion ennemi, et de l'y maintenir. De là, toutes les opérations de calcul ou déplacement de l'arme sont effectuées automatiquement.

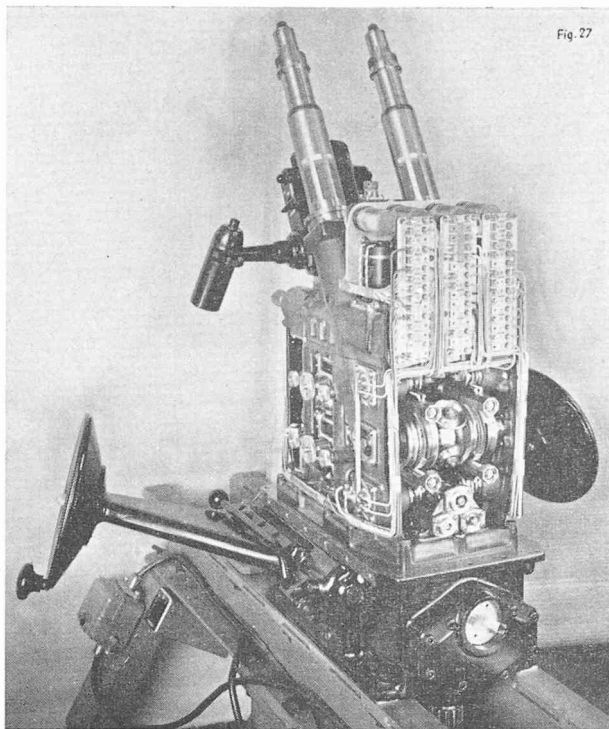


Fig. 27. — Servo-viseur sans tête de visée et capot.

L'importance de la théorie des mouvements transitoires, dont nous avons parlé, ressort des temps d'action qui sont à disposition du pointeur, et qui sont effectivement respectés par l'appareil.

Si nous prenons le cas typique d'un avion se présentant à 90° des lignes de visée et de l'arme, le servo-viseur étant au repos, nous obtenons comme délai d'ouverture de feu :

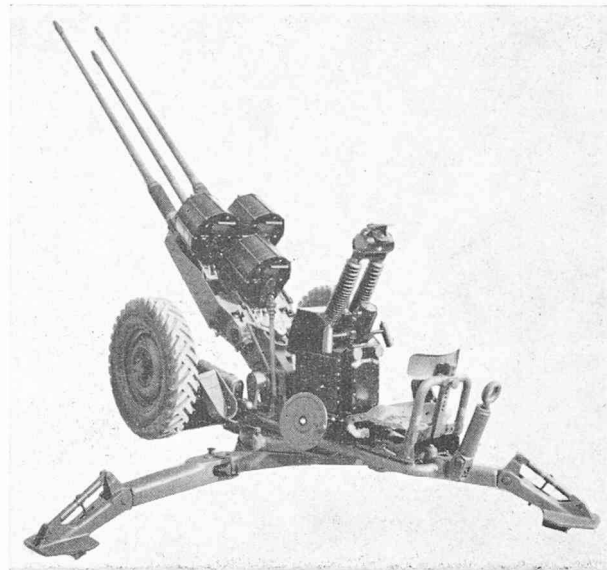


Fig. 28. — Affût HSS-635 avec servo-viseur.

Mise en route	1 sec.
Rotation 90° + acquisition . .	2 sec.
Calcul + stabilisation . . .	2 sec.
	5 sec.

Ceci, avec des échelons position et vitesse de sens contraire. Cet excellent résultat est toutefois absolument nécessaire. Car, si nous découvrons un avion à 3000 m de distance, ce qui est le cas par ciel légèrement nébuleux, et si cet avion vole à 300 m/sec, le feu ne sera ouvert que quand il sera déjà à 1500 m, et le point futur de la première rafale sera à peine à plus de 1000 m de l'arme.

DIVERS

Vers la production et l'utilisation de l'énergie nucléaire en Suisse romande

Fondation à Lausanne de la Société «Energie Nucléaire S.A.»

Dès le début de 1956, quelques personnalités de Suisse romande, conscientes de la nécessité de rassembler les disponibilités et les compétences diverses offertes par quelques-unes de nos industries de fabrication de matériels, de production et de distribution d'énergie électrique, et par quelques bureaux d'études, décidèrent de créer une *Communauté d'intérêts pour l'étude de la production et de l'utilisation industrielles de l'énergie nucléaire*. Il convenait en effet, au vu du développement des applications industrielles de l'énergie nucléaire, d'étudier sans retard les moyens selon lesquels cette nouvelle source d'énergie pourrait venir combler pour notre pays le déficit qui apparaîtra certainement dans quelques années, malgré l'effort considérable exécuté pour l'aménagement de nos dernières chutes d'eau.

Dans des conditions propres à sauvegarder en ce domaine les intérêts économiques de la Suisse romande, les travaux de la Communauté devaient rapidement permettre l'examen des multiples questions que posent la fabrication, la fourniture, l'installation et l'exploitation des biens d'équipement de centrales nucléaires.

Pour répondre à ces buts, la Communauté créée porta

son effort sur le groupement des éléments d'une documentation et l'exécution d'études générales devant permettre dans un avenir le plus proche possible l'établissement de plans de centrales nucléaires. Il ne s'agissait pas avant tout, comme pour Réacteur S.A., de recherche scientifique, mais essentiellement de travaux devant permettre la construction de réacteurs de puissance avec production d'énergie qui pourrait être livrée aux réseaux.

Dès ses origines, la Communauté tint au courant de ses efforts le délégué du Conseil fédéral aux questions atomiques. Son accueil favorable a permis au groupement romand d'envisager la construction d'une petite centrale nucléaire, qui, tout en répondant aux buts recherchés par les industries et sociétés constituant la Communauté, pourrait par ailleurs servir les intérêts de l'Ecole polytechnique de Lausanne et des universités romandes pour la formation des cadres, physiciens et ingénieurs, dont notre économie a un urgent besoin. Dès lors, la Communauté, dont l'activité se poursuivra à l'avenir, devait envisager de créer un organisme ne se limitant pas aux seules études des problèmes posés par la construction de centrales nucléaires, mais ayant pour but de construire de telles centrales, la première pouvant être celle mentionnée plus haut et cela dans un avenir rapproché et avec l'appui des autorités fédérales. Cette centrale, mise en exploitation le plus rapidement possible aux environs de Lausanne, s'intégrerait ensuite dans le cadre de l'Exposition nationale 1964.