



HAL
open science

Application de la théorie des systèmes asservis à la régulation de vitesse des groupes hydro-électriques : analyse et recherche de perfectionnements

Lucas Pun

► **To cite this version:**

Lucas Pun. Application de la théorie des systèmes asservis à la régulation de vitesse des groupes hydro-électriques : analyse et recherche de perfectionnements. Modélisation et simulation. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1954. Français. NNT : . tel-00277444

HAL Id: tel-00277444

<https://theses.hal.science/tel-00277444>

Submitted on 6 May 2008

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

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

N° D'ORDRE :

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

M. LUCAS PUN
Ingénieur E. S. E.

- 1^{re} THÈSE. — APPLICATION DE LA THÉORIE DES SYSTÈMES ASSERVIS A LA RÉGULATION DE VITESSE DES GROUPES HYDRO-ÉLECTRIQUES : ANALYSE ET RECHERCHE DE PERFECTIONNEMENTS.
- 2^e THÈSE. — OSCILLATIONS DE RELAXATION.

Soutenues le 30 octobre 1954 devant la commission d'examen.

M. ESCLANGON *Président.*
M. FALLOT }
M. J. KUNTZMANN } *Examineurs.*

PARIS
GAUTHIER-VILLARS, ÉDITEUR-IMPRIMEUR-LIBRAIRE
Quai des Grands-Augustins, 55

1955

A Monsieur le Professeur Kuntzmann
avec mes sentiments respectueux

L. Poin

N° D'ORDRE :

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

M. LUCAS PUN

Ingénieur E. S. E.

1^{re} THÈSE. — APPLICATION DE LA THÉORIE DES SYSTÈMES ASSERVIS A LA RÉGULATION DE
VITESSE DES GROUPES HYDRO-ÉLECTRIQUES : ANALYSE ET RECHERCHE
DE PERFECTIONNEMENTS.

2^e THÈSE. — OSCILLATIONS DE RELAXATION.

Soutenues le 30 octobre 1954 devant la commission d'examen.

M. ESCLANGON *Président.*
M. FALLOT }
M. J. KUNTZMANN } *Examineurs.*

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, ÉDITEUR-IMPRIMEUR-LIBRAIRE

Quai des Grands-Augustins, 55

1955

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

FACULTÉ DES SCIENCES

Doyens honoraires

MM. GAC
FORTRAT

Doyen

M. MORET, Correspondant de l'Institut.

Professeurs honoraires

MM. FAVARD, Professeur à la Sorbonne (Math.)
FORTIER, Professeur à la Sorbonne (Méc. des Fluides).
GIGNOUX, Membre de l'Institut (Géologie).
BRELOT, Professeur à la Sorbonne (Math.).
De LITARDIÈRE, Botanique.

Professeurs

MM. FORTRAT..... Physique générale, Corresp. de l'Institut.
MORET..... Géologie et Minéralogie, Corresp. de l'Institut.
ANDRIEUX..... Chimie, Corresp. de l'Institut.
NÉEL..... Physique expérimentale, Membre de l'Institut.
PARDE..... Hydrologie fluviale.
ESCLANGON..... Physique industrielle.
DORIER..... Zoologie.
HEILMANN..... Chimie.
KRAVTCHEKHO..... Mécanique rationnelle.
BENOIT..... Radio-Électricité.
CHENE..... Chimie papetière.
NOBECOURT..... Micrographie papetière.
WEIL..... Physique.
FELICI..... Physique.

KUNTZMANN..... Analyse appliquée.
DODERO..... Electrochimie et Electro-metallurgie.
N..... Calcul différentiel et intégral.
BARBIER..... Géologie appliquée.
SANTON..... Mécanique des fluides.
OZENDA..... Mathématiques.

Professeurs sans chaire

MM. FALLOT..... Physique.
REULOS..... Physique.
TRAYNARD..... Chimie.
SILBER..... Mécanique des fluides.
GALVANI..... Mathématiques.

Maitre de conférences honoraire

M. OFFNER..... Botanique.

Maitres de conférences

MM. REEB..... Mathématiques.
SOUTHÉ..... Physique.
CRAYA..... Mécanique, physique.
GALLISSOT..... Mécanique.
M^{me} LUTZ..... Mathématiques.
AYANT..... Physique.
MICHEL..... Géologie.

Secrétaire principal

M. GRENIER

Secrétaire

M. BICHET

PREMIÈRE THÈSE

RÉGULATION DE VITESSE DES GROUPES HYDROÉLECTRIQUES. ANALYSE ET RECHERCHE D'UNE CONSTITUTION OPTIMUM

SOMMAIRE.

INTRODUCTION.

CHAPITRE I : *Méthode d'études des systèmes asservis linéaires et analyse des circuits de régulation à correcteurs classiques.*

1. 1. Conception et qualificatif principal d'un circuit de régulation.
1. 2. Performances temporelles du message transmis et utilisation de la méthode gain-phase.
1. 3. Analyse des circuits de régulation à corrections classiques.

CHAPITRE II : *Analyse des perfectionnements.*

2. 1. Effets du coup de bélier sur la stabilité.
2. 2. Perfectionnements de la première catégorie (visant la vitesse ou le vannage).
2. 3. Perfectionnements de la deuxième catégorie (visant la pression de l'eau au vannage).

CHAPITRE III : *Recherche d'une constitution optimum.*

3. 1. Considérations générales.
3. 2. Optimum temporel ou recherche de la loi optimum de transfert du système.
3. 3. Optimum spatial ou recherche de la technologie optimum de transfert du système.
3. 4. Proposition d'une constitution optimum du circuit de régulation.

NOTATIONS.

BIBLIOGRAPHIE.

Durant les années 1945-1946, MM. GADEN et ALMÉRAS ont successivement étudié le comportement dynamique de la régulation de vitesse des groupes hydroélectriques, notamment celui du système d'alimentation par conduite forcée, et ont permis d'expliquer les oscillations de réglage en basse chute, dues aux effets dits « du coup de bélier ». Pour remédier à ces oscillations, les solutions étaient d'augmenter les masses tournantes des groupes : solutions électriquement souvent non optimum, et coûteuses pour les installations d'unités importantes. Depuis 1947, M. DÉJOU, le R. P. DANIEL, M. NASSE ont successivement étudié des dispositifs tendant à diminuer les masses tournantes. La diversité de notations, et des méthodes d'études utilisées, n'ont pas toujours permis une approbation générale de l'un ou l'autre dispositif. Une unification paraît nécessaire. Par ailleurs, l'accroissement d'importances unitaires des groupes, la nécessité des réglages multiples, conduisent à de nouvelles considérations sur la technologie de la régulation. Les deux premiers chapitres de ce travail ont pour but de considérer le circuit de régulation comme un système asservi, ce qui permet d'utiliser l'analyse harmonique pour examiner les correcteurs classiques et les dispositifs de perfectionnement. Le troisième chapitre tente de rechercher une constitution optimum du circuit de régulation tenant compte des aspects à la fois temporel et spatial du transfert. Une liste de notations est résumée. La bibliographie contient, outre les références indispensables, quelques documentations ayant trait aux différents sujets contenus dans ce travail ([3], [12], [13], [15], [21], [38]).

Chapitre I.

MÉTHODE D'ÉTUDES
DES SYSTÈMES ASSERVIS LINÉAIRES
ET ANALYSE DES CIRCUITS DE RÉGULATION
À CORRECTEURS CLASSIQUES ([42] à [61]).

1.1. CONCEPTION ET QUALIFICATIF PRINCIPAL
D'UN CIRCUIT DE RÉGULATION ([56], [60], [71]).

1.1.1. Un circuit de régulation est un cas particulier
de systèmes à contrôle automatique.

Un système à contrôle automatique est un ensemble d'éléments physiques de constitution quelconque chargé de transmettre automatiquement le message « contrôle » (fig. 1.1). A la sortie de cet ensemble, le signal d'utilisation à contrôler est retourné à l'entrée, pour être comparé au signal contrôlé; l'ensemble du système agit de sorte que le message « contrôle » soit accompli quelles que soient les perturbations externes. Selon la constitution de l'ensemble on distingue :

- systèmes automatiques à « tout ou rien »;
- systèmes automatiques par impulsion;
- systèmes asservis proportionnels (S. A. P.).

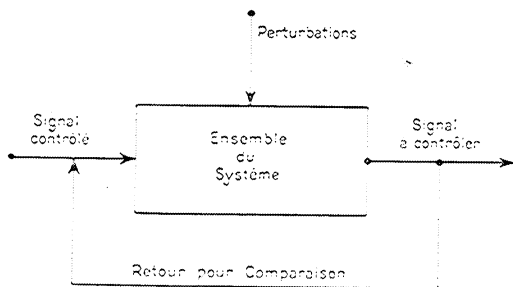


Fig. 1.1. — Système à contrôle automatique.

Un S. A. P. fonctionne soit en servomécanisme (signal d'entrée de déroulement quelconque, perturbations nulles), soit en régulateur (signal d'entrée constant = référence, perturbations de déroulement quelconque). Dans le circuit de régulation de vitesse des groupes hydroélectriques, le point de réglage peut être appelé à changer en cours de fonctionnement. c'est un S. A. P. de fonctionnement général.

Dans un S. A. P., les considérations de « petits mouvements » permettent de linéariser le comportement dynamique de la plupart des éléments constitutants, ce qui justifie l'utilisation de l'analyse harmonique. On constate que deux simplifications ont été faites dans la conception de tels systèmes :

- parmi les nombreux signaux physiques circu-

lant à travers l'ensemble, seul le signal intéressant est considéré, il est aussi supposé à circuler dans des directions déterminées, le système est donc conçu d'une façon subjective et directionnelle;

— la loi de transfert, de nature implicite et complexe, est explicitée et linéarisée.

1.1.2. Le qualificatif principal des S. A. P.
est la fonction de transfert à boucle ouverte
(f. de tr. à b. o.).

Un S. A. P. peut être représenté par la constitution fondamentale représentée sur la figure 1.2. Le signal à contrôler y est détecté par l'élément de retour de loi $\beta(p)$ pour être comparé au signal contrôlé x , l'écart $\varepsilon = x - y\beta(p)$ est d'abord amplifié par l'élément $\mu_1(p)$, puis agit sur l'élément de puissance $\mu_2(p)$, de façon que le contrôle soit accompli quelles que soient les perturbations z appliquées à l'élément de puissance.

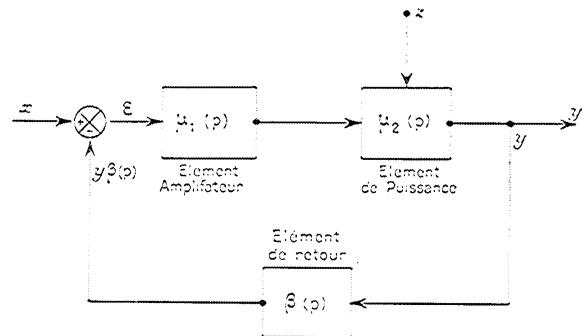


Fig. 1.2. — Constitution fondamentale d'un S. A. P.

Le S. A. P. peut être qualifié par les effets qu'il produit sur le transfert du message durant le régime transitoire (comportement de y) et le régime permanent (comportement de ε). Pour un S. A. P. de fonctionnement général, ces effets peuvent être connus en appliquant la loi de « la superposition d'états » (état servomécanisme et état régulateur). Utilisant les écarts relatifs, les comportements de ε et de y sont caractérisés par les relations

$$(1.1) \quad \varepsilon = \frac{1}{1 + \beta_1 \mu_1 \mu_2} x - \frac{\mu_2}{1 + \beta_1 \mu_1 \mu_2} z,$$

$$(1.2) \quad y = \frac{\mu_1 \mu_2}{1 + \beta_1 \mu_1 \mu_2} x - \frac{\mu_2}{1 + \beta_1 \mu_1 \mu_2} z.$$

Au point de vue physique, durant le régime transitoire, la référence x rappelle toujours les perturbations à l'ordre, tandis que durant le régime permanent, les erreurs s'ajoutent. Le dénominateur commun $W(p) = (1 + \beta_1 \mu_1 \mu_2)$ à toutes les fractions est l'équation caractéristique de l'ensemble.

L'expression $T(p) = \beta_1 \mu_1 \mu_2$ est la fonction de transfert du S. A. P. à boucle ouverte (f. de tr. à b. o.); on constate qu'il est le qualificatif principal du S. A. P. Dans beaucoup de cas, le dosage de l'élément de retour, jouant un rôle statique pur, est pris pour unité; il s'ensuit que

$$\beta_1(p) = 1 \quad \text{et} \quad T(p) = \mu_1(p) \mu_2(p).$$

1.2. PERFORMANCES TEMPORALES DU MESSAGE TRANSMIS ET UTILISATION DE LA MÉTHODE GAIN-PHASE ([42], [43], [44], [45], [48], [58]).

1.2.1. La stabilité (régime transitoire) et la précision (régime permanent)

sont les performances temporelles du message transmis.

Avant d'étudier les lois de transfert du S. A. P., il importe de savoir quelles sont les performances temporelles du message transmis à connaître.

1.2.1.1. Régime transitoire (fig. 1.3). — Existence de stabilité : le transfert est stable si le signal y revient à un état assigné après une ou des variations aléatoires de x ou de z .

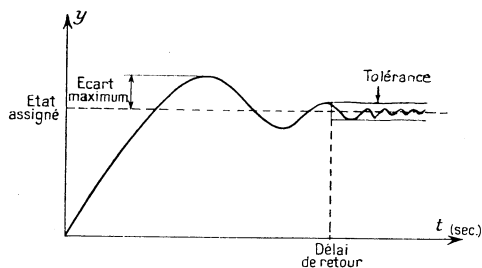


Fig. 1.3. — Performances du régime transitoire.

— Degré de stabilité : un retour stable peut avoir un écart maximum (ε_{\max}) et un délai (τ_r) rapporté aux tolérances plus ou moins grandes selon les dosages statiques et les lois dynamiques des éléments constituants.

— Stabilité absolue ou conditionnelle : le transfert est absolument stable s'il l'est quel que soit le dosage statique de l'ensemble du système. Cette performance est particulièrement importante pour les systèmes contenant des éléments électroniques à dosage variable.

1.2.1.2. Régime permanent (fig. 1.4). — Précision statique : caractérisée par l'erreur statique ε_s due à la constitution du système.

— Précision dynamique : caractérisée par l'erreur ε_d (ou ε'_d) due au déroulement aléatoire de x ou de z .

Remarques. — Les performances spatiales : sensibilité, retards constants se rapportent au comportement spatial de transfert, elles influent sur le comportement temporel du transfert. Les perfor-

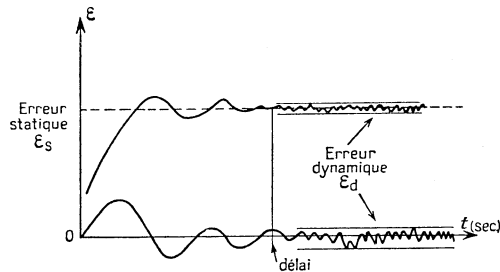


Fig. 1.4. — Performances du régime permanent.

mances temporelles connues sous les noms de « rapidité de réponse », « constantes de temps » sont comprises dans les définitions ci-dessus.

1.2.2. L'analyse harmonique
fournit la base mathématique
pour l'étude temporelle complète du message transmis.

Dans l'analyse dite transitoire (terme très sujet aux confusions), les signaux d'entrée sont décomposés en échelons unité de Heaviside. Le système est qualifié par des fonctions de pondération, les signaux de sortie peuvent être calculés par les formules de Pomey. Les régimes transitoire et permanent sont analytiquement calculables, quoique difficilement. Les essais aux échelons sont basés sur cette analyse. Le calcul symbolique facilite l'analyse transitoire; le symbole p est considéré comme un opérateur; le système se caractérise par son équation caractéristique polynôme en p , la stabilité peut être examinée sans résoudre cette équation, par des critères tels que le critère Routh-Hurwitz, le critère Léonhard, le critère Nasse.

Dans le critère de Nyquist, p est encore considéré comme un opérateur, la stabilité est seule intéressée. Pour les théoriciens des systèmes asservis, toute les performances temporelles sont intéressantes, la fonction de transfert isomorphe de Nyquist est utilisée et généralisée. Tandis que les intégrales de Fourier lient la fonction de pondération à la fonction de transfert isochrone, la transformation de Laplace la lie à la fonction de transfert isomorphe, p est alors considéré comme un échelon de fréquence isomorphe,

$$p = \delta + j\omega,$$

$j\omega$, sinusoides purs;

δ , incréments ou décréments purs.

D'où l'analyse harmonique; elle permet, comme l'analyse transitoire, l'étude de toutes les perfor-

TABLEAU 1.1. — Représentations graphiques des fonctions de transfert typiques.

Forme Générale $T(p) = T_0(p) \cdot T_0'(p) \cdot T_1(p) \cdot T_1'(p) \cdot T_{1-}(p) \cdot T_{1-}'(p) \cdot T_2(p) \cdot T_2'(p)$ $T(j\omega)$ forme isochrone (utilisée pour les représentations)		Représentation Polaire $T(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega)$ Représentation Logarithmique $\left\{ \begin{array}{l} G(\omega) = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)} \\ \Phi(\omega) = \arctg \frac{B(\omega)}{A(\omega)} \end{array} \right.$		
Fonctions de Transferts Typiques Groupe	Expressions	Représentation Polaire	Représentation Logarithmique	
			Gain G (db) - $\log \omega$	Phase Φ (degré) - $\log \omega$
0	$T_0(p) = \frac{p}{(\tau_i p)^n}$			
	$T_0'(p) = \frac{(\frac{1}{\tau_i p})^n}{(\frac{\omega_i}{p})^n}$			
1	$T_1(p) = \frac{p\tau_i + 1}{p + \omega_i}$			
	$T_1'(p) = \frac{1}{p\tau_i + 1} = \frac{\omega_i}{p + \omega_i}$			
1-	$T_{1-}(p) = \frac{1 - p\tau_i}{\omega_i - p}$			
	$T_{1-}'(p) = \frac{1}{1 - p\tau_i} = \frac{\omega_i}{\omega_i - p}$			
2	$T_2(p) = \frac{\tau_i^2 p^2 + 2\zeta\tau_i p + 1}{p^2 + 2\zeta\omega_i p + \omega_i^2}$			
	$T_2'(p) = \frac{1}{\tau_i^2 p^2 + 2\zeta\tau_i p + 1} = \frac{\omega_i^2}{p^2 + 2\zeta\omega_i p + \omega_i^2}$			
$\omega_i = \frac{1}{\tau_i}$ $G(\text{db}) = 20 \log_{10} G$		Courbes de gain exactes en pointillé Courbes Asymptotiques $\left\{ \begin{array}{l} \text{négliger } \omega\tau_i \text{ devant } 1 \text{ pour } \omega\tau_i < 1 \\ \text{négliger } 1 \text{ devant } \omega\tau_i \text{ pour } 1 < \omega\tau_i \end{array} \right.$		

mances temporales. Pour les équations différentielles à coefficients constants, la symétrie permet, lors du tracé graphique des fonctions de transfert isomorphes, de représenter uniquement la partie relative aux fréquences entre $\omega = 0$ et $\omega = +\infty$, ce qui forme la base des essais aux fréquences sinusoïdales pures.

L'analyse harmonique n'est valable que pour les systèmes linéaires.

1.2.3. *La représentation logarithmique gain-phase de la f. de tr. à b. o. donne les grandeurs de mérite de toutes les performances temporales.*

Reconsidérons la figure 1.2 et les équations (1.1) et (1.2), le qualificatif principal du S. A. P. est $T(p)$ qui peut s'écrire

$$T(p) = G(p) \underline{\Phi(p)}.$$

Le théorème des valeurs initiales et finales et le critère de Nyquist fournissent les bases d'études graphiques de précision et de stabilité. Pour les systèmes à constantes réelles, il suffit de représenter les valeurs de p de $j\omega = 0$ à $j\omega = +\infty$: on remplace $T(p)$ par

$$T(j\omega) = G(j\omega) \underline{\Phi(j\omega)}.$$

La représentation logarithmique gain-phase, la plus utilisée à cause de leurs propriétés graphiques, consiste à tracer des courbes de gain et de phase ayant pour ordonnée $20 \log_{10} G$ (dB) et Φ (degré) et pour abscisse $\log \omega$. Une échelle supplémentaire de marge de phase N , dont le 0° correspond à -180° de Φ , permet d'établir un diagramme unique sur lequel toutes les performances temporales possèdent leurs grandeurs de mérite.

La figure 1.5 représente la f. de tr. à b. o. d'un

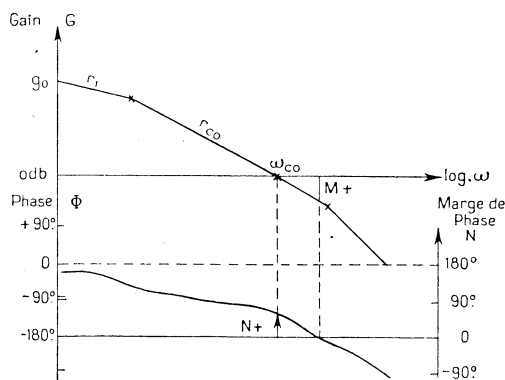


Fig. 1.5. — Diagramme unique.

certain système. La courbe de gain G coupe l'abscisse 0 dB à la pulsation de coupure ω_{co} , où correspond la marge de phase N , les courbes de gain sont toujours représentées par des branches asympto-

tiques de pente $r_1, r_2, \dots, r_{co}, \dots$, $T(p)$ se compose toujours de f. de tr. élémentaires types dont les représentations sont établies d'avance (tableau 1.1). Le tableau 1.2 résume les grandeurs de mérite des diverses performances temporales avec leurs condi-

TABLEAU 1.2. — *Grandeurs de mérite des performances.*

	Performances.	Grandeurs de mérite.
Régime transitoire	Existence de stabilité	$N \geq 0$ ou $r_{co} \geq -12$ dB/oct
	Degré de stabilité	$N \geq 45^\circ$ (utilisée en général)
	Stabilité absolue	$M \geq +10$ dB
Régime permanent	Précision statique : $\varepsilon_s = 0$	Λ gauche de ω_{co}
	Précision dynamique : $\varepsilon_d \rightarrow 0$	$r > -18$ dB/oct
		$\Phi > -180^\circ$

tions correspondantes. Pour les éléments à déphasage non minimum, c'est-à-dire ceux dont la fonction de transfert contient des zéros ou des pôles à partie réelle positive, seule la considération de phase compte pour les performances de stabilité.

1.3. ANALYSE DES CIRCUITS DE RÉGULATION À CORRECTEURS CLASSIQUES ([2], [17], [24]).

1.3.1. *Le réglage tachymétrique simple (système de base) est oscillatoire.*

Dans le système de réglage tachymétrique simple (fig. 1.6), les écarts relatifs de vitesse v (écarts relatifs par rapport à la vitesse de régime normal N_n) sont détectés par le tachymètre (Ta), traverse l'ensemble amplificateur d'efforts, tiroir de distribution (T-D) et servomoteur (S-M), agit sur le vannage pour annuler les écarts relatifs. En prenant comme unité le dosage tachymétrique (2)

$$\sigma = v.$$

En qualifiant l'ensemble T-D et S-M (le système d'alimentation supposé pour le moment sans effets

(2) Les constantes de temps auxiliaires (tachymètre, tringlerie, etc.) ont comme f. de tr. soit un pôle simple, soit un quadrilatère :

$$K_a \frac{\omega_a}{p + \omega_a} \quad \text{ou} \quad K_a \frac{\omega_a^2}{p^2 + 2\zeta_a \omega_a p + \omega_a^2}.$$

Dans l'un ou l'autre cas, si ω_a ($r:s$) est élevée (constante de temps faible), les déphasages introduits sont négligeables, les f. de tr. sont des dosages K_a statiques purs.

de coup de bélier) par une constante de temps τ' :

$$(1.3) \quad \tau' \frac{d\lambda}{dt} = \sigma, \quad \text{d'où} \quad \mu_1(p) = \frac{\lambda(p)}{\sigma(p)} = \frac{1}{\tau' p}.$$

En supposant que le rendement de la turbine soit constant, et que toutes les puissances soient mesurées à la vitesse de régime normal N_n , les écarts relatifs de vannage, de puissance et de couple-moteur sont exprimés par le même nombre λ .

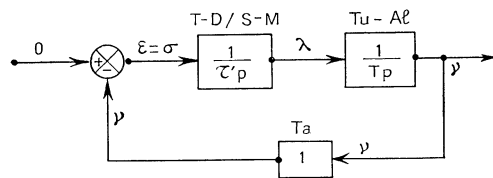
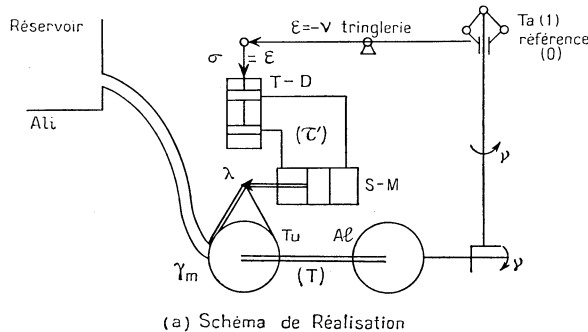


Fig. 1.6. — Réglage tachymétrique simple.

En qualifiant l'ensemble Tu-Al par son temps de lancer T (secondes) et en supposant que les charges soient constantes à l'instant considéré et que le coefficient d'autorégulation α soit négligeable (³) :

$$(1.4) \quad \frac{v(p)}{\lambda(p)} = \frac{1}{T(p)}.$$

Le schéma de bloc-diagramme de l'ensemble du système peut être représenté par celui de la figure 1.6b. Sa f. de tr. à b. o. s'écrit

$$(1.5) \quad \begin{cases} T_0(p) = \frac{1}{\tau' T p^2} = \frac{\omega_0^2}{p^2}, \\ \omega_0^2 = \frac{1}{\tau' T}. \end{cases}$$

(³) Les effets du coefficient d'autorégulation α se voient en représentant la nouvelle f. de tr. à b. o. qui devient

$$T_0 \alpha(p) = \frac{1}{\tau' p (T p + \alpha)}.$$

Selon la valeur positive ou négative de α , il y a une marge de phase N positive ou négative par rapport à $T_0(p)$.

Les courbes gain-phase sont représentées sur la figure 1.7. La courbe de gain G_0 a une pente constante de -12 dB/oct, coupant l'axe 0 dB à la pulsation

$$\omega_{co} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau' T}}.$$

La courbe de phase Φ a une valeur constante de -180° , la marge de phase N est nulle : le système est oscillatoire.

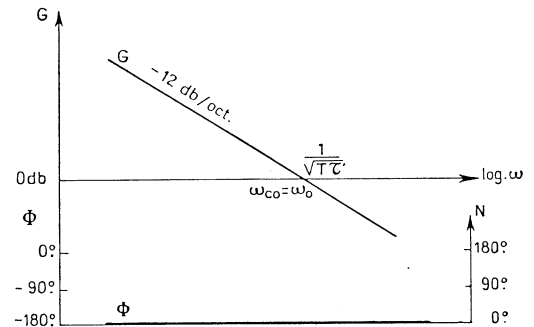


Fig. 1.7. — Représentation de $T_0(p) = \frac{1}{\tau' T p^2}$.

1.3.2. Les correcteurs classiques sont des avanceurs de phase $+6$ dB/oct.

Trois correcteurs classiques de stabilité sont connus. Le premier correcteur est constitué par une came de pente ou degré de statisme :

$$\delta = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_n} \quad (\%)$$

et dont l'action se retranche de celle du tachymètre. L'élément effectue une contre-réaction autour de T-D/S-M, sa f. de tr. est (voir tableau 1.3)

$$(1.6) \quad \beta_s = \frac{\sigma_s(p)}{\lambda(p)} = \delta \quad (\text{dosage statique pur}).$$

Le deuxième dispositif à statisme temporaire se compose d'une came de pente δ' (%), d'un dash-pot de constante de temps τ'' (secondes), et des ressorts de constante K_r . Le statisme sert à stabiliser le réglage, et disparaît après son action. L'élément effectue aussi une contre-réaction autour de T-D/S-M, sa f. de tr. est

$$(1.7) \quad \beta_t = \frac{\sigma_t(p)}{\lambda(p)} = \frac{\delta' p}{p + \frac{K_r}{\tau''}}.$$

Le troisième accéléromètre, de dosage m (secondes), détecte la dérivée de la vitesse et agit sur le T-D,

TABLEAU 1.3. — Correcteurs classiques.

Correcteur	Emplacement de l'élément	Correcteur en Cascade Equivalent $\mu_c(p)$	Représentation de $\mu_c(p)$
Statisme Permanent δ degré de statisme	<p style="text-align: center;">$\beta_s = \delta$</p>	$\frac{Cp}{Cp+\delta} = \frac{p}{\omega_s} \times \frac{\omega_s}{p+\omega_s}$ <p style="text-align: center;"> $\omega_s = \frac{\delta}{C}$ </p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Type $T_0(p)$</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Type $T_1(p)$</div> </div>	
Statisme Temporaire K_r constante des ressorts C' coefficient de viscosité (sec.) δ' degré de statisme temporaire	<p style="text-align: center;">$\beta_t = \frac{\delta' p}{p + K_r/C'}$</p>	$\frac{p + \frac{K_r}{C'}}{p + \frac{K_r}{C'} + \frac{\delta'}{C'}} = gt \frac{p + \omega_1}{\omega_1} \frac{\omega_2}{p + \omega_2}$ <p style="text-align: center;"> $\omega_1 = \frac{K_r}{C'}$ $\omega_2 = \frac{K_2}{C'} + \frac{\delta'}{C'}$ $gt = \frac{\omega_1}{\omega_2} < 1$ (affaiblissement) </p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Type $T_1(p)$</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Type $T_1(p)$</div> </div>	
Accéléromètre m dosage accélérométrique (sec.)	<p style="text-align: center;">$\mu_m = mp$</p>	$mp + 1 = \frac{p + \omega_m}{\omega_m}$ <p style="text-align: center;"> $\omega_m = \frac{1}{m}$ </p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 0 auto;">Type $T_1(p)$</div>	

en s'ajoutant à l'action tachymétrique, sa f. de tr. est

$$(1.8) \quad \frac{\sigma_m(p)}{\varepsilon(p)} = mp.$$

Pour voir le rôle fonctionnel de ces éléments, il suffit de situer ces blocs dans le diagramme de l'ensemble, et de chercher la f. de tr. de leur correcteur en cascade équivalent. Pour les deux premiers, on applique les formules des amplificateurs à contre-réaction; pour le troisième, c'est $(1 + mp)$. Dans le tableau 1.2, ces f. de tr. sont mises sous forme d'éléments type, leur représentation montre que ce sont des avanceurs de phase $+6$ dB/oct, pouvant apporter au système de base une avance de phase entre 0 et 90° , selon la valeur relative de ω_0 et les paramètres de ces correcteurs.

1.3.3. Les correcteurs classiques ne stabilisent pas d'une façon identique.

Sur le tableau 1.4, sont représentés les trois systèmes de réglage à correcteurs classiques avec leur

bloc-diagramme correspondant. Les f. de tr. s'obtiennent en multipliant celle du circuit de base $T_0(p)$ par les correcteurs en cascade $\mu_c(p)$ respectifs. Les effets sur la stabilité peuvent être vus sur les représentations $G - \Phi$ des $T(p)$. La notion de marge suffisante entend un comportement satisfaisant des performances écart maximum (inférieur à 1,3 en général) et délai de retour. Les méthodes graphiques plus avancées permettent des informations plus qualitatives, cette marge se concrétise en général par la condition $N \geq 45^\circ$.

Le statisme permanent a un inconvénient systématique, le δ nécessaire dépasse 20 % pour les valeurs usuelles de τ' et T . Le dispositif à statisme temporaire a un dosage optimum eu égard à ses paramètres, son utilisation est délicate surtout si l'on désire tenir compte des effets du coup de bélier; il introduit une diminution de gain direct, et nécessite des S-M plus puissants. Le système tachy-accélérométrique est astatique, sans diminution de gain par rapport au système de base.

TABLEAU 1.4. — Systèmes de réglage à correcteurs classiques.

Schéma de Réalisation	Blocs - Diagramme et F. de Tr. à b.o. T(p)	Représentation de T(p)	Effets des Correcteurs sur la Stabilité (N ≥ 45°)
	$\frac{1}{C'p^2} \times \frac{C'p}{C'p + \delta}$		<p>N ≥ 45° si $\delta \geq \sqrt{C'T}$</p> <p>Statisme au moins 20% pour N suffisante</p>
	$\frac{1}{C'p^2} \times \frac{p + \frac{K_r}{C'}}{p + \frac{K_r}{C'} + \frac{\delta}{C'}}$		<p>Régime Optimum (N ≥ 45°)</p> <p>$\frac{K_r}{C'} \leq 3,84 \frac{1}{\sqrt{C'T}}$</p> <p>$\delta' \geq 9,2 \frac{1}{\sqrt{C'T}}$</p>
	$\frac{1 + mp}{T C' p^2}$		<p>N ≥ 45° si</p> <p>$m \geq \sqrt{T C'}$</p> <p>astatique</p>

Chapitre II.

ANALYSE DES PERFECTIONNEMENTS.

2.1. EFFETS DU COUP DE BÉLIER SUR LA STABILITÉ ([29], [38]).

2.1.1. Le système d'alimentation est un élément à déphasage non minimum.

La conduite forcée, amenant l'eau du réservoir jusqu'à la turbine, est analogue à une ligne de transmission électrique à constantes réparties. Après chaque variation de vannage, la pression et la vitesse d'écoulement d'eau, respectivement analogues aux potentiel et courant électriques, sont des fonctions bidimensionnelles par rapport au temps et à l'abscisse le long de la conduite. Dans le cas général, la f. de tr. du vannage au couple-moteur est une fonction trans-

cendante :

$$(2.1) \quad \frac{\gamma_m(p)}{\lambda(p)} = f(\text{th } p).$$

On démontre, analytiquement et graphiquement, que le système de réglage oscille surtout en cas de basse chute : fait confirmé aussi par la pratique. Dans le cas de basse chute, la conduite forcée étant courte, l'élasticité de l'eau peut être négligée; l'inertie de l'eau est seule considérée. Appliquant la loi des quantités de mouvement, et en désignant par θ (secondes) la constante de temps de la conduite, on peut expliciter les relations opérationnelles :

$$(2.2) \quad \mu'_a(p) = \frac{\xi(p)}{\lambda(p)} = -\frac{\theta p}{1 + \frac{\theta}{2} p},$$

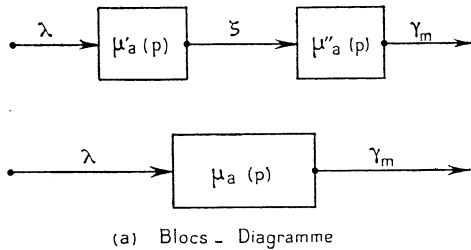
$$(2.3) \quad \mu''_a(p) = \frac{\gamma_m(p)}{\xi(p)} = -\frac{1 - \theta p}{\theta p}.$$

La f. de tr. du système d'alimentation prend

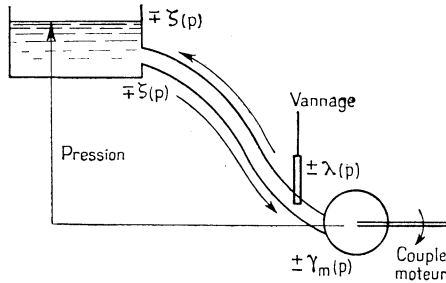
l'expression (fig. 2.1 a) :

$$(2.4) \quad \mu_a(p) = \mu'_a(p) \mu''_a(p) = \frac{1 - \theta p}{1 + \frac{\theta}{2} p}$$

Le message à transmettre arrive sous forme d'écart de vannage (fig. 2.1 b), se transforme en écart de pression en montant le long de la conduite, et en écart de couple-moteur en descendant.



(a) Blocs - Diagramme



(b) Transfert Physique du Message

Fig. 2.1. — Système d'alimentation.

Le terme $(1 - \theta p)$ constitue un élément à déphasage non minimum, sa courbe de phase est asymptotique à 0 et -90° . L'ensemble de $\mu_a(p)$ introduit donc un retard de 0 à -180° selon la valeur de ω . Ce retard est calculable graphiquement, connaissant $\omega_0 = \frac{1}{\theta}$.

2.1.2. Le coup de bélier rend le système de base (stabilité à la limite) instable.

Les effets du coup de bélier sur la stabilité peuvent être vus en représentant

$$(2.5) \quad T'_0(p) = T_0(p) \mu_a(p) = \frac{1}{T\tau' p^2} \frac{1 - \theta p}{1 + \frac{\theta}{2} p}$$

Premier cas : $T\tau' < \theta^2$ (fig. 2.1 bis). — Selon la valeur de $T\tau'$ (pour θ donnée), la marge de phase négative est de -90 à -180° . Aucun correcteur classique ne pourrait apporter une avance de phase suffisante.

Deuxième cas : $T\tau' > \theta^2$. — La marge négative est de 0 à -90° . Les correcteurs classiques, avanceurs de phase $+6$ dB/oct (0 à $+90^\circ$) peuvent redonner la stabilité. En supposant les dosages de correction maximum ($+90^\circ$ d'avance), pour que $N \geq 45^\circ$, il faut que

$$T\tau' \geq 3\theta^2.$$

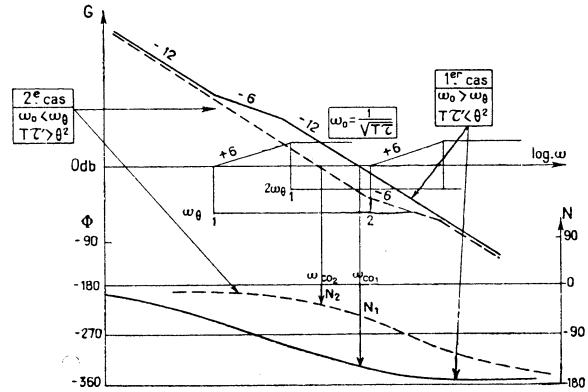


Fig. 2.1 bis. — Effets du coup de bélier sur la stabilité.

2.2. PERFECTIONNEMENTS DE LA PREMIÈRE CATÉGORIE ([13], [15]).

Ce sont ceux visant la vitesse de rotation ou le vannage, deux des formes du message transmis :

Déjou 1 : Ensemble accéléromètre et statisme temporaire.

Déjou 2 : Détecteur de dérivée seconde de vitesse.

Daniel 1 : Intégrateur.

L'analyse de ces perfectionnements nécessite celle du système entier, et est faite selon le processus suivant :

- 1° Schéma du système entier en bloc-diagramme.
- 2° Recherche de la f. de tr. à b. o. $T(p)$.
- 3° Représentation $G - \Phi$ de $T(p)$.
- 4° Discussion de la stabilité selon les grandeurs de mérite.

La représentation de $T(p)$ est effectuée pour le meilleur cas de dosage. Les valeurs de $T\tau'$ admissibles concernant une même base de stabilité suffisante, $N \geq 45^\circ$.

2.2.1. Déjou 1 : L'utilisation simultanée de l'accéléromètre et du statisme temporaire est délicate.

Le système Déjou 1 (fig. 2.2) consiste à utiliser simultanément les deux correcteurs classiques. En

TABLEAU 2.1. — Perfectionnements de la première catégorie.

Blocs - Diagramme	F. de Tr. à b.o. T(p)	Représentation de T(p) (le meilleur cas de Stabilité)	Performances
<p>Déjou 1</p> <p> $\omega_3^2 = \frac{2}{\theta} \left(\frac{K_2^2}{C''} + \frac{\delta'}{C'} \right)$ $2\xi_3\omega_3 = \frac{2}{\theta} + \frac{K_2^2}{C''} - \frac{2\delta'}{C'}$ $\omega_t = \frac{K_2}{C''}$ </p>	<p>Base Bélier</p> <p>$T_0(p) \times (1 - \theta p)$</p> <p>Accéléromètre</p> <p>$\times (1 + mp)$</p> <p>$\times g_{tb} \frac{\omega_t + p}{\omega_t} \cdot \frac{\omega_3^2}{p^2 + 2\xi_3\omega_3 p + \omega_3^2}$</p> <p>↑ [μ_{tb}]</p>		<p>Utilisation du Statisme Temporaire en présence des effets du coup de bélier est délicate</p> <p>Les avances de phase ne s'ajoutent pas intégralement</p> <p>N max < 135° Pour N ≥ 45°</p> <p>$\underline{CT} \approx \theta^2$</p>
<p>Déjou 2</p> <p> $\omega_4^2 = \frac{1}{\theta} \frac{1}{\theta}$ $2\xi_4\omega_4 = \frac{1}{\theta}$ </p>	<p>Base Bélier</p> <p>$T_0(p) \times \frac{1 - \theta p}{1 + \frac{\theta}{2} p}$</p> <p>Correcteurs</p> <p>$\times \frac{p^2 + 2\xi_4\omega_4 p + \omega_4^2}{\omega_4^2}$</p> <p>↑ [Correcteurs]</p>		<p>Forme (1+mp+np²) intéressant un critère de précision</p> <p>N max < 90° Pour N ≥ 45°</p> <p>$\underline{CT} \approx 3\theta^2$</p>
<p>Daniel 1</p> <p> $\mu_1(p) = \frac{1}{2} \times \frac{C_1 p + 1}{C_1 p}$ </p>	<p>Base Bélier</p> <p>$T_0(p) \times \frac{1 - \theta p}{1 + \frac{\theta}{2} p}$</p> <p>Correcteurs</p> <p>$\times \frac{1}{2C_1 p} (1 + C_1 p + 2C_1 m p^2)$</p> <p>↑ [Correcteurs]</p>		<p>Stabilité conditionnelle</p> <p>Amélioration de précision</p> <p>N max < 90° Pour N ≥ 45°</p> <p>$\underline{CT} \approx 3\theta^2$</p>

tenant compte des effets du coup de bélier $\mu_a(p)$, la f. de tr. de la boucle secondaire est

$$(2.6) \quad T_1(p) = \frac{\frac{1}{c'p} \frac{1 - \theta p}{1 + \frac{\theta}{2} p}}{1 + \frac{\delta' p}{K_r} \frac{1}{c'p} \frac{1 - \theta p}{1 + \frac{\theta}{2} p}}$$

En posant

$$\omega_t = \frac{K_r}{c''},$$

$$\omega_3^2 = \frac{2}{\theta} \left(\frac{K_r}{c''} + \frac{\delta'}{c'} \right), \quad g_{tb} = \frac{\omega_t}{\omega_3},$$

$$2\xi_3\omega_3 = \frac{2}{\theta} + \frac{K_r}{c''} - \frac{2\delta'}{c'}$$

La f. de tr. à b. o. du système entier est

$$(2.7) \quad T(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2} (1 + mp)(1 - \theta p) \times g_{tb} \frac{\omega_t + p}{\omega_t} \frac{\omega_3^2}{p^2 + 2\xi_3\omega_3 p + \omega_3^2}$$

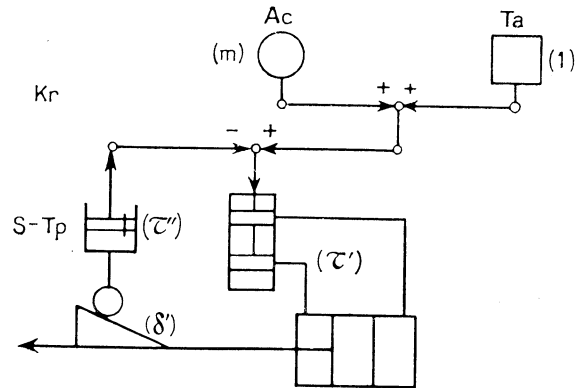


Fig. 2.2. — Dispositif Déjou 1.

L'expression quadrilatère, pour certaines valeurs de K_r , τ'' et δ' par rapport à θ , peut contenir un pôle p_0 tel que

$$\Re(p_0) \geq 0.$$

Non seulement $T(p)$ contiendrait alors un zéro $(1 - 0p)$ qui introduit un retard supplémentaire, mais il y a donc aussi risque de pôle à déphasage non minimum. Dans un tel cas, le système serait instable.

L'expression

$$(2.8) \quad \mu_{lb} = g_{lb} \frac{\omega_l + p}{\omega_l} \frac{\omega_3^2}{p^2 + 2\xi_3 \omega_3 p + \omega_3^2}$$

présente certaines analogies avec le correcteur μ_c dans le cas de statisme temporaire sans effets de coup de bélier : affaiblissement g_{lb} , avanceur de phase pour certaines conditions de ω_l et ω_3 , existence d'un dosage optimum. En présence de μ_{lb} , l'avance de phase du terme $(1 + mp)$ ne s'y ajoute pas littéralement, la pulsation de coupure ne pouvant toujours pas intervenir à l'endroit où Φ est positif maximum. L'ensemble de ces considérations conduit aux cinq conditions suivantes :

Première condition. — Non-existence des fractions instables :

$$0 < \frac{2}{\frac{\delta'}{\tau'} - \frac{K_r}{\tau'}} \quad (\xi_3 > 0 \text{ dans } \mu_{lb}).$$

Deuxième condition. — Avance de phase possible du statisme temporaire ($\omega_3 > \omega_l$) :

$$0 < 2 \left(\frac{\tau''}{K_r} \right)^2 \left(\frac{K_r}{\tau'} + \frac{\delta'}{\tau'} \right) \quad (\text{avance} \geq 45^\circ).$$

Troisième condition. — Non-intervention du coup de bélier ($\omega_3 < \omega_0$) :

$$0 < \frac{1}{2 \left(\frac{K_r}{\tau'} + \frac{\delta'}{\tau'} \right)}.$$

Quatrième condition. — Régime optimum du statisme temporaire $[\omega_{co} = (\omega_l^2 \omega_3)^{\frac{1}{3}}]$:

$$\frac{K_r}{\tau''} < \frac{1}{\sqrt{T\tau'}} < \sqrt{\frac{2}{0} \left(\frac{K_r}{\tau'} + \frac{\delta'}{\tau'} \right)}.$$

Cinquième condition. — Contribution accélérométrique ($\omega_3 < \omega_m < \omega_3$) :

$$\frac{1}{\sqrt{T\tau'}} < \frac{1}{m} < \sqrt{\frac{2}{0} \left(\frac{K_r}{\tau'} + \frac{\delta'}{\tau'} \right)}.$$

2.2.2. Déjou 2 :

Le détecteur de dérivée seconde de vitesse ne donne pas de marge de phase supplémentaire.

Le système Déjou 2 consiste à utiliser (fig. 2.3), en plus des détecteurs tachy et accélérométriques, un détecteur de dérivée seconde de vitesse, qui fait intervenir la tendance de la tendance de variations de vitesse.

L'ensemble des correcteurs (tableau 2.1, 2^e ligne) a pour f. de tr. :

$$(2.9) \quad \left\{ \begin{array}{l} \mu_c = 1 + mp + np^2 = \frac{p^2 + 2\xi_1 \omega_1 p + \omega_1^2}{\omega_1^2}, \\ \omega_1^2 = \frac{1}{n}, \\ 2\xi_1 \omega_1 = \frac{m}{n}; \end{array} \right.$$

avanceur de phase + 12 dB/oct; l'avance de phase

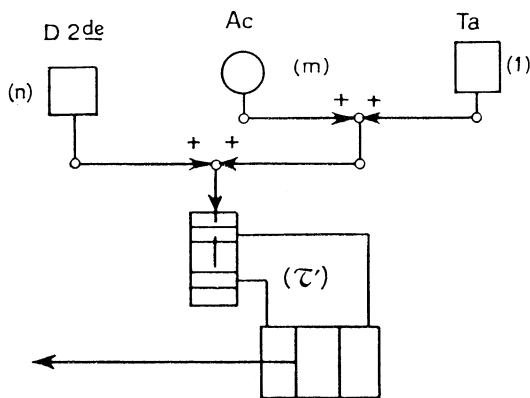


Fig. 2.3. — Dispositif Déjou 2.

peut être de 180° asymptotiquement. La f. de tr. à b. o. est

$$(2.10) \quad T(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2} \frac{1 - 0p}{1 + \frac{0}{2}p} (1 + mp + np^2).$$

Pour que la marge dépasse 90°, il faudrait que $\omega_4 < \omega_0$: ce qui aurait pour effet de rejeter la pulsation de coupure ω_{co} à une valeur indéterminée et très élevée, dans la région où la phase Φ tombe de nouveau à - 180°. Pour les dosages $\omega_4 < \omega_0$, la marge de phase reste inférieure à 90°. Le détecteur de dérivée seconde n'apporte pas de marge de phase supplémentaire. Au chapitre III, il sera montré que la forme $(1 + mp + np^2)$ intéresse un critère de précision.

2.2.3. Daniel 1 :

L'intégrateur apporte une amélioration de précision.

Le système Daniel 1 (fig. 2.4) consiste à utiliser un intégrateur Ig de constante de temps τ_i , c'est un petit ensemble T-D/S-M à connexions croisées. En supposant que les bras soient égaux $a = b$, la f. de tr. $\mu_i(p)$ de cet élément est

$$(2.11) \quad \mu_i(p) = \frac{\varepsilon'(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{2} \frac{\tau_i p + 1}{\tau_i(p)}.$$

L'ensemble des correcteurs a pour fonction de transfert :

$$(2.12) \quad \mu_c(p) = \mu_i(p) + mp = \frac{1}{2\tau_i p} [1 + \tau_i p + 2\tau_i m p^2].$$

Il y a avance de phase pour $m \leq 2\tau_i$.

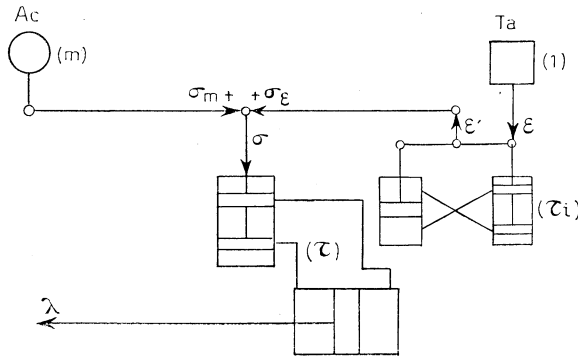


Fig. 2.4. — Dispositif Daniel 1.

La f. de tr. à b. o. du système entier :

$$(2.13) \quad T(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2} \frac{1 - \theta p}{1 + \frac{\theta}{2} p} \frac{1}{2\tau_i p} [1 + \tau_i p + 2\tau_i m p^2].$$

Prenant $m = 2\tau_i$, le dosage le plus stable (tableau 2.1, 3^e ligne) est obtenu pour

$$\omega_0 > \frac{1}{\sqrt{2\tau_i m}} \quad \text{ou} \quad m^2 > T\tau'.$$

La marge de phase maximum est inférieure à 90°, l'existence de branche — 18 dB/oct indique que la stabilité est conditionnelle. Par contre, la précision est améliorée par rapport au système $T_0(p)$.

2.3. PERFECTIONNEMENTS DE LA DEUXIÈME CATÉGORIE ([13], [38]).

Ce sont ceux visant spécialement la pression de l'eau au vannage, une autre forme du message transmis :

Daniel 2 : Manomètre simple.

Daniel 3 : Manomètre différentiel.

Dispositif Nasse : Manomètre à dérivée.

Tous ces correcteurs effectuent une contre-réaction autour de l'ensemble T-D/S-M et Ali; il suffit donc d'analyser la nouvelle loi de transfert à travers le système d'alimentation. En l'occurrence, il s'agit d'examiner comment le retard de $\mu_c(p)$ se trouve atténué.

Le processus d'analyse est le suivant :

1° Bloc-diagramme de l'ensemble T-D/S-M, Ali, et l'élément de contre-réaction.

2° F. de tr. de cette boucle secondaire, $T_1(p)$.

3° Représentation de $T_1(p)$ en la comparant à

$$(2.14) \quad T_{10}(p) = \frac{1}{\tau' p} \frac{1 - \theta p}{1 + \frac{\theta}{2} p}.$$

4° Examen du déphasage et conclusions.

L'analyse de ces trois dispositifs est résumée sur le tableau 2.2 dans les quatre colonnes correspondantes.

2.3.1. Daniel 2 : Le manomètre simple rend moins prononcé le retard de béliet.

Le système Daniel 2 consiste à utiliser un manomètre de dosage K_{ms} détectant les écarts de pression et à faire agir cette action au T-D (fig. 2.5).

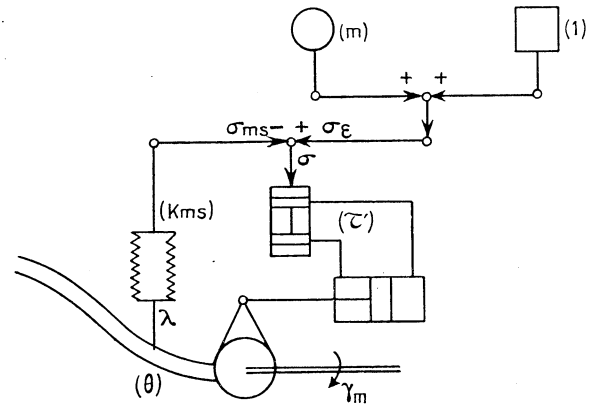


Fig. 2.5. — Daniel 2 : Manomètre simple.

La f. de tr. de l'élément manomètre est

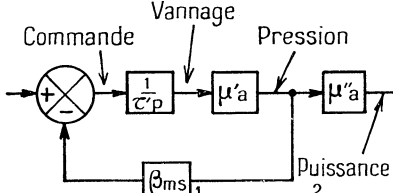
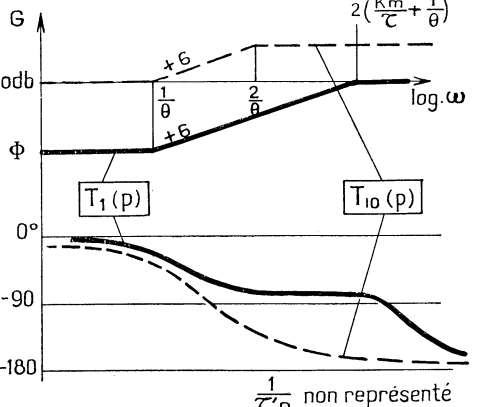
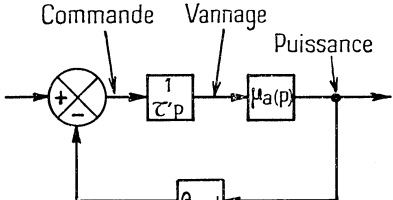
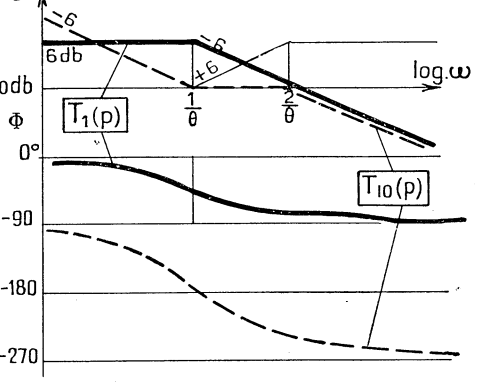
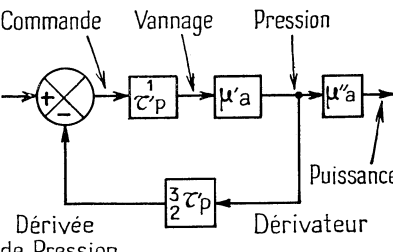
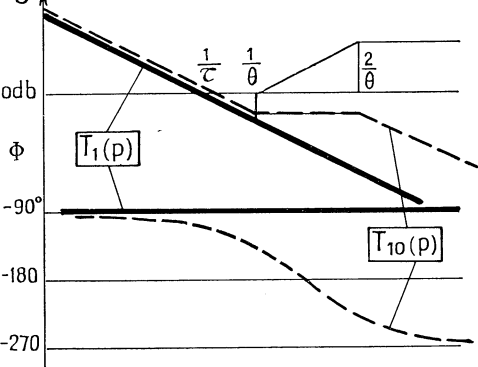
$$(2.15) \quad \zeta_{ms} = \frac{\sigma_{ms}(p)}{\lambda(p)} = K_{ms}.$$

La fonction de transfert de la boucle secondaire (tableau 2.2, 1^{re} ligne) est

$$(2.16) \quad T_1(p) = \frac{1}{\tau' p} \frac{1 - \theta p}{\frac{1}{\theta} p + 2 \left(\frac{K_{ms}}{\tau'} + \frac{1}{\theta} \right)};$$

$$(2.16 \text{ bis}) \quad \left\{ \begin{array}{l} T_1(p) = \frac{1}{\tau' p} g_b \frac{\omega_0 - p}{\omega_0} \frac{2\omega_0'}{p + 2\omega_0'}, \\ \omega_0' = \frac{K_{ms}}{\tau'} + \frac{1}{\theta} > \omega_0, \\ g_b = \frac{\omega_0}{\omega_0'} < 1. \end{array} \right.$$

TABEAU 2.2. — Perfectionnements de la deuxième catégorie.

Commande de Vannage	Comparaison de $T_1(p)$ et de $T_{10}(p)$	Performances
 <p> $T_1(p) = \frac{1}{c'p} \times \frac{1}{1+\theta p} \times \frac{2}{p+2(\frac{K_m}{c'}+\frac{1}{\theta})}$ $T_{10}(p) = \frac{1}{c'p} \times \frac{1-\theta p}{1+\frac{\theta}{2}p}$ $\mu'a(p) = -\frac{\theta p}{1+\frac{\theta}{2}p}$ $\mu''a(p) = -\frac{1-\theta p}{\theta p}$ $\beta_{ms} = Kms$ </p>		<p>Retard bélien moins prononcé</p> <p>Diminution de précision (gain à $p \rightarrow 0$ affaibli)</p> <p>$N \geq 45^\circ$</p> <p>si $T'c' > 2\theta^2$ (pour $Kms \rightarrow \infty$)</p>
 <p> $T_1(p) = \frac{2}{\theta p+1} = \frac{2}{c'p+1}$ $\mu_a = \frac{1-\theta p}{1+\frac{\theta}{2}p}$ $\beta_{md} = Kmd$ </p>		<p>Statisme $Kp = -\frac{1}{2}$ (-50%) inadmissible</p> <p>Autrement il y aurait:</p> <ol style="list-style-type: none"> suppression du retard bélien apport d'avance de phase amélioration de précision en basse fréquence (perturbations lentes) <p>Par ailleurs, réserve sur la validité de simplification du terme $(1-\theta p)$</p>
 <p> $T_1(p) = \frac{1}{c'p}$ </p>		<p>Suppression des effets du coup de bélier sur la stabilité</p> <p>Réserve sur la validité de simplification du terme $(1-\theta p)$</p>

En représentant $T_1(p)$ et en la comparant avec $T_{10}(p)$ (le terme $\frac{1}{c'p}$ a été volontairement omis pour ne pas charger le dessin), on constate

que le retard de bélier est moins prononcé à certaines pulsations. La cause d'instabilité n'est pas supprimée, mais atténuée. A cause de g_0 , il y a diminution de gain.

2.3.2. Daniel 3 : Le manomètre différentiel pourrait supprimer l'élément à déphasage non minimum.

Le système Daniel 3 utilise (fig. 2.6) un manomètre différentiel de dosage K_{md} , il est constitué d'un ensemble de deux manomètres dont l'un détecte la valeur moyenne de la pression et l'autre la pression

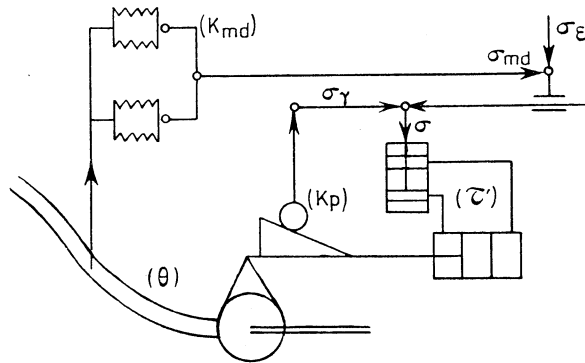


Fig. 2.6. — Daniel 3 : Manomètre différentiel.

instantanée. En plus, il utilise une came de statisme K_p . Au cours des perturbations :

$$FN \cong K_{md} \left(\frac{1}{2} \xi \right),$$

$$FP \cong K_p \lambda.$$

Leurs actions combinées :

$$(2.17) \quad \sigma' = K_p \lambda + \frac{1}{2} K_{md} \xi = K_p \left(\lambda + \frac{K_{md}}{2 K_p} \xi \right).$$

Si le dosage K'_m est

$$K_{md} = 3 K_p,$$

il s'en suivra que

$$\sigma' = K_p \left(\lambda + \frac{3}{2} \xi \right).$$

Or

$$P = L \cdot H^{\frac{3}{2}}.$$

En valeurs relatives :

$$\gamma_m = \lambda + \frac{3}{2} \xi.$$

L'ensemble des deux détecteurs effectue une contre-réaction de γ_m autour de T-D/S-M et Ali (tableau 2.2, 2^e ligne). La f. de tr. de l'élément de retour est

$$\beta_p = K_p.$$

La f. de tr. de la boucle secondaire devient

$$(2.18) \quad T_1(p) = - \frac{1 - \theta p}{\frac{\tau' \theta}{2} p^2 + (\tau' - \theta) p + K_p}.$$

Si l'on prenait $\tau' = 0$ et $K_p = -\frac{1}{2}$ (50 %),

$$(2.18 \text{ bis}) \quad \left\{ \begin{array}{l} T_1(p) = - \frac{1 - \theta p}{\frac{1}{2} (\theta^2 p^2 - 1)} = \frac{2}{\theta p + 1} \\ \text{ou } \frac{2}{\tau' p + 1}. \end{array} \right.$$

L'avance de phase est nette. Non seulement il n'y aurait plus de retard de bélier, le terme $\frac{1}{\tau' p}$ étant contre-réactionné, le retard n'est plus uniformément -90° ; une marge de phase positive est devenue possible.

Toutefois, un statisme $K_p = -50\%$ est inadmissible; une réalisation technologique irréversible astatique est nécessaire. Par ailleurs, il y a eu une simplification de $(1 - \theta p)$ dans la fraction de $T_1(p)$; sa validité sera discutée à la fin du chapitre.

2.3.3. Système Nasse : Le manomètre à dérivée, dosé convenablement, supprime les effets du coup de bélier sur la stabilité.

Le système Nasse consiste à utiliser un manomètre à dérivée détectant la dérivée de la pression d'eau au vannage (fig. 2.7). A l'encontre des autres systèmes, ce dispositif est obtenu déductivement (fig. 2.8). L'analyse de l'ensemble D-L (régleur-

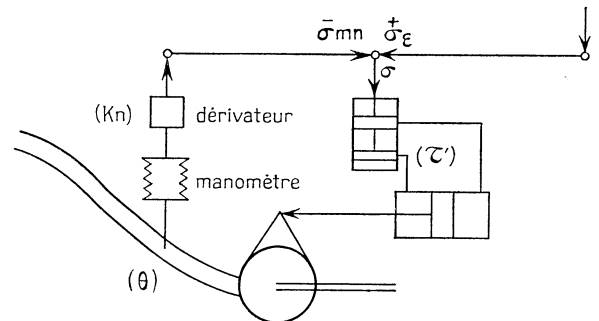
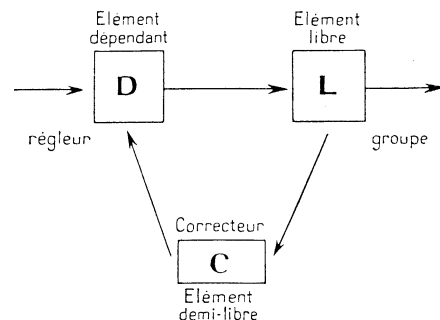


Fig. 2.7. — Système Nasse : Manomètre à dérivée.



D L par critère NASSE → C

Fig. 2.8. — Obtention du dispositif Nasse.

groupe) avec le critère Nasse conduit à l'utilisation d'un correcteur C de fonction de transfert β . Dans la notation Nasse :

$$\beta = \frac{\delta' T_{so}(k+1)p}{2}$$

Dans notre notation :

$$\beta = \frac{3}{2} \tau' p \quad \left(\tau_m = \frac{3}{2} \tau' \text{ en secondes} \right).$$

La f. de tr. de la boucle secondaire, y compris $\mu_a''(p)$, devient

$$(2.19) \quad T_1(p) = -\frac{0}{\tau'(1-0p)} \left(-\frac{1-0p}{0p} \right) = \frac{1}{\tau' p}$$

L'élément $\mu_a(p)$ a complètement disparu, les effets du coup de bélier sur la stabilité sont supprimés.

Annexe : Validité de simplification dans les systèmes Daniel 3 et Nasse.

Dans $T_1(p)$ de ces deux systèmes, une simplification de

$$\frac{1-0p}{1-0p} = 1$$

a été effectuée. Ceci suppose que les paramètres physiques de T-D/S-M, de Ali, et même de Tu-Al, sont bien déterminés, constants, ou de variations à loi fixe. Autrement,

$$T(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1+mp}{T\tau'p^2} \frac{1-0p}{1-M0p} \quad (M \neq 1),$$

$$W(p) = \frac{(1+mp)(1-0p)}{-MT\tau'0p^3 + (T\tau' - 0^2)p^2 + (m-0)p + 1},$$

une instabilité éventuelle est possible. [On peut analyser $T(p)$ avec la méthode gain-phase, $W(p)$ avec le critère Routh-Hurwitz, etc.]

Chapitre III.

RECHERCHE D'UNE CONSTITUTION OPTIMUM.

3.1. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES ([62] à [72]).

3.1.1. *Tous les aspects du transfert sont à considérer.*

Pour un système de conception subjective et directionnelle, l'optimum de constitution du système est obtenu quand la largeur de la voie de transfert est juste égale aux exigences de transfert du message (fig. 3.1). Ce dernier étant exécuté dans le temps et dans l'espace, il y a donc lieu de considérer l'aspect temporel et l'aspect spatial du transfert.

3.1.2. *L'aspect temporel concerne les performances temporelles du transfert.*

Pour un système de fonctionnement général (fig. 3.2), les données sont les perturbations z et le signal d'entrée référence x . Toutes variations de x et de z suscitent un déroulement temporel du message défini par la sortie y durant le régime transitoire,

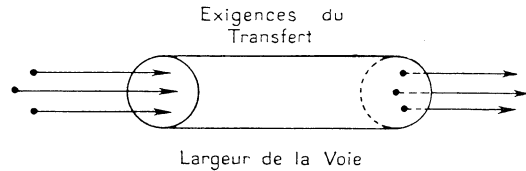


Fig. 3.1. — Transfert d'un message.

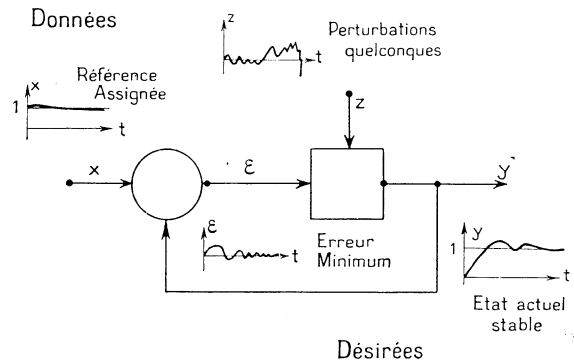


Fig. 3.2. — Aspect temporel du transfert.

et par l'erreur ε durant le régime permanent. Le message « contrôle automatique » est bien transmis si, durant le régime transitoire, il y a une stabilité inconditionnelle et suffisante; et si, durant le régime permanent, la précision est maximum. La constitution du système est optimum si toutes ces exigences sont satisfaites.

3.1.3. *L'aspect spatial fait changer la technologie de transfert.*

Deux catégories d'éléments physiques sont distinguées dans un circuit de régulation : les uns, fondamentaux, tels que groupe, détecteur, amplificateur, etc., les autres servant à les lier, appelés éléments de liaison, tels que la tringlerie, le fil électrique, etc. C'est l'ensemble qui est chargé du transfert spatial du message.

Pour les groupes de faible puissance unitaire (fig. 3.3), les éléments fondamentaux sont de dimensions relativement réduites et sont proches les uns des autres. Une transmission purement mécanique reste viable. Pour les groupes de puissance unitaire

importante, des transmissions à distance par voies électriques ou électroniques se révèlent indispensables.

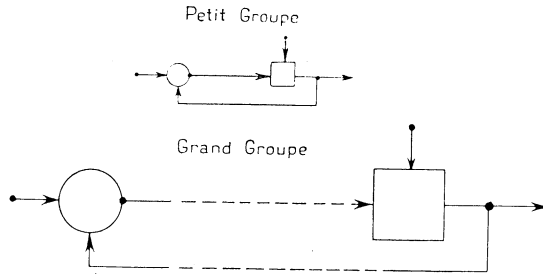


Fig. 3.3. — Aspect spatial du transfert.

3.2. OPTIMUM TEMPORAL OU RECHERCHE DE LA LOI OPTIMUM DE TRANSFERT DU SYSTÈME.

3.2.1. Le critère de précision est primordial.

Considérons (fig. 3.4) le système actuel formé du système de base $T_0(p)$, muni d'un certain correcteur

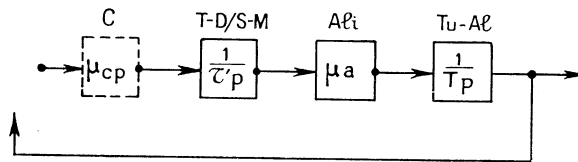


Fig. 3.4. — Correcteur de maximum de précision.

de précision $\mu_{cp}(p)$, les effets du coup de bélier étant représentés par $\mu_a(p)$. M. G. LEHMANN a montré que pour des systèmes contenant des éléments à déphasage non minimum tels que le terme $(1 - \theta p)$, le maximum de précision que tout correcteur peut apporter au système, tout en le dotant d'une stabilité *inconditionnelle*, est celui conduisant à une f. de tr. à b. o. du système entier de

$$(3.1) \quad T(p) = \frac{1 - \theta^2 p^2}{\theta^2 p^2}.$$

Or, dans le cas actuel :

$$(3.2) \quad T(p) = \mu_{cp} \frac{1}{c'p} \frac{1 - \theta p}{1 + \frac{\theta}{2} p} \frac{1}{Tp}.$$

D'où en identifiant

$$(3.3) \quad \mu_{cp}(p) = 1 + mp + np^2.$$

Avec les dosages :

$$\tau' = \frac{\theta^2}{T}, \quad m = \frac{3\theta}{2}, \quad n = \frac{\theta^2}{2}.$$

3.2.2. La stabilité doit être suffisante.

La représentation (fig. 3.5) de l'expression

$$T(p) = \frac{1 - \theta^2 p^2}{\theta^2 p^2}$$

permet de voir que la phase Φ est uniformément -180° . La stabilité est à la limite. Un correcteur de stabilité, en l'occurrence, une avanceur de phase $+6$ dB/oct est indispensable pour avoir une stabilité suffisante.

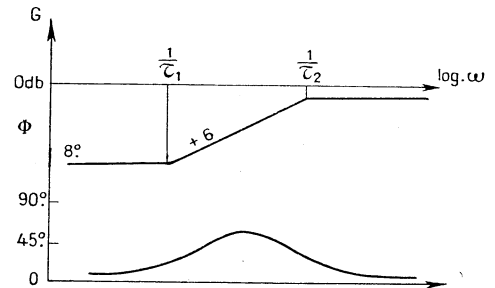


Fig. 3.5. — Correcteur de stabilité.

L'un de ces avanceurs le plus simple peut être constitué par un circuit R-C,

$$(3.4) \quad \mu_{cs}(p) = g_0 \frac{1 + \tau_1 p}{1 + \tau_2 p}, \quad \text{avec } \frac{1}{\tau_1} < \frac{1}{\theta} < \frac{1}{\tau_2}.$$

Les dosages τ_1, τ_2 , cause de l'affaiblissement g_0 , doivent être juste suffisants pour introduire une marge de phase, $N = 45^\circ$.

3.2.3. Le correcteur unique, fonctionnel, peut être appliqué à un point quelconque de transmission.

Le correcteur unique prend la forme

$$(3.5) \quad \mu_{cs}(p) = \mu_{cp}(p) \mu_{cs}(p) \\ = g_0 \frac{1 + \tau_1 p}{1 + \tau_2 p} (1 + mp + np^2).$$

Il est purement fonctionnel, et peut être appliqué à un point quelconque de transmission. Il est possible de le constituer par des éléments physiques de nature quelconque selon les progrès technologiques de transfert spatial. Il est toujours préférable de l'appliquer à une zone où la puissance en jeu est faible.

3.3. OPTIMUM SPATIAL OU RECHERCHE DE LA TECHNOLOGIE OPTIMUM DE TRANSFERT DU SYSTÈME.

3.3.1. Une détection électrique devient indispensable.

L'accroissement des puissances unitaires des groupes

rend impossible l'utilisation des tachymètres mécaniques et des transmissions par tringlerie. L'un des moyens utilisés pour détecter les écarts de vitesse est d'utiliser des alternateurs pilotes (Ap) (fig. 3.6) dont la fréquence est proportionnelle à chaque instant à la vitesse de rotation du groupe; un pont de résonance P donnera une tension électrique proportionnelle aux

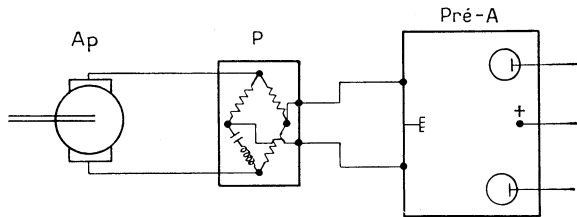


Fig. 3.6. — Détection électrique.

écarts de vitesse, un préamplificateur Pré-A push-pull comprenant des étages électroniques spéciaux transformera la tension alternative en tension continue et élèvera l'amplitude du signal au niveau voulu.

3.3.2. *L'électrovalve est devenu un élément de liaison courant dans les systèmes asservis.*

L'ensemble T-D/S-M, amplificateur d'effort principal, reste un élément de hautes performances (au point de vue de seuil, hystérésis, etc.). Les progrès actuels dans les machines électriques ne permettent pas encore de le remplacer par un moteur électrique. L'arrivée du signal étant une tension électrique, un élément de liaison est devenu indispensable. L'électrovalve (fig. 3.7) à aimant permanent, ou à

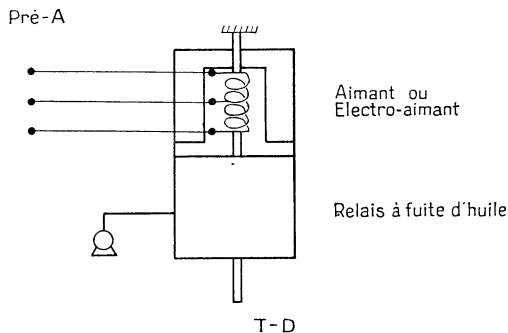


Fig. 3.7. — Electrovalve.

électroaimant permet de jouer un tel rôle. La bobine mobile reçoit le signal du push-pull, la sortie mécanique peut être amplifiée par un relais à fuite d'huile, avant d'attaquer le tiroir de distribution.

3.3.3. *Le correcteur temporel μ_c peut être réalisé par un réseau de coefficient de transfert.*

Le progrès réalisé dans les calculateurs analogiques, notamment dans les amplificateurs c. c. à grand gain sans dérives, permet de fabriquer des fonctions de transfert quelconques avec de très hautes performances (précision et fidélité, etc.). De tels réseaux (fig. 3.8) sont constitués d'un amplificateur à courant

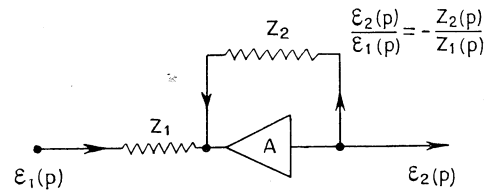


Fig. 3.8. — Réseaux de fonctions.

continu à correction de dérive et de gain très élevé (supérieur à 10^5), d'une impédance directe Z_1 et d'une impédance de contre-réaction Z_2 . Il est démontré que, entre l'entrée et la sortie, il existe la relation

$$(3.6) \quad \frac{\varepsilon_2(p)}{\varepsilon_1(p)} = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}$$

Le correcteur total μ_c , réalisé avec une telle technique, peut être appliqué entre le pont de résonance et le préamplificateur, zone de faible puissance.

3.4. PROPOSITION D'UNE CONSTITUTION OPTIMUM DU CIRCUIT DE RÉGULATION.

3.4.1. *F. de tr. à b. o. de l'ensemble et sa représentation.*

Tenant compte des deux correcteurs μ_{cp} et μ_{cs} , la f. de tr. à b. o. de l'ensemble du système s'écrit

$$(3.7) \quad T(p) = g_0 \frac{1 + \tau_1 p}{1 + \tau_2 p} \frac{1 - \theta^2 p^2}{\theta^2 p^2}$$

Sa représentation (fig. 3.9) montre que le système a une stabilité inconditionnelle et suffisante tout en ayant un maximum de précision.

3.4.2. *Réalisation technologique de l'ensemble.*

L'écart de vitesse (fig. 3.10), détecté par l'alternateur pilote, est transformé en tension électrique par le pont de résonance. Le réseau de μ_c apporte la correction en stabilité et en précision. Après les éléments préamplificateur et électrovalve, l'écart de vitesse agit sur le vannage par l'amplificateur d'efforts ensemble T-D et S-M.

3.4.3. Conclusions générales.

Les sous-titres des différents chapitres ont été conçus pour faire ressortir les conclusions que je désire attribuer à ce travail. Toutefois, je pense que le pro-

être d'un certain apport. Le chemin expérimental le plus viable reste sans doute celui de la simulation. L'idée, depuis longtemps, a été partiellement exploitée : les modèles réduits hydrauliques, les microréseaux, etc. Les progrès réalisés dans le domaine électronique permettent maintenant de simuler de nombreux phéno-

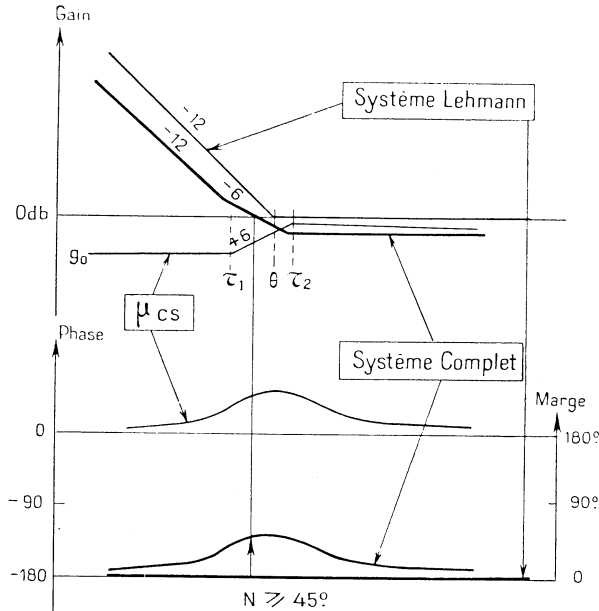


Fig. 3.9. — Loi optimum de transfert.

blème ne sera complètement résolu que si l'on peut avoir accès aux non-linéarités qui sont par ailleurs nombreuses (seuils et hystérésis mécaniques, variations de rendements de la turbine, limiteurs d'ouverture de vannage, etc.). D'autre part, le chiffrage analytique du délai de retour reste encore difficile. Les calculateurs numériques et analogiques peuvent

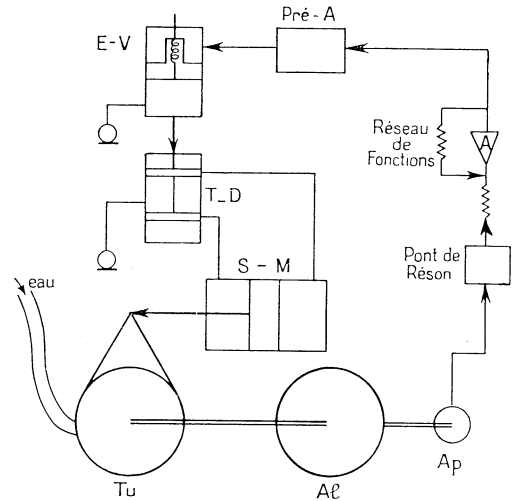


Fig. 3.10. — Technologie optimum de transfert.

mènes physiques. Le moment de reconsidération du problème et de synthèse générale est peut-être venu.

Reconnaissance.

Ma profonde gratitude à M. F. ESCLANGON, sous la direction duquel ce travail a pu être réalisé. Je remercie aussi M. G. LEHMANN qui a daigné me parrainer, et M. G. NASSE qui m'a offert la tribune de la Société française des Électriciens.

NOTATIONS.

ANALYSE.

Temps.....	t
Pulsation.....	$\omega = 2\pi f$
Constantes de temps (s).....	τ
Imaginaire.....	j
Opérateur de Fourier.....	$j\omega$
Opérateur de Laplace.....	$p = \sigma + j\omega$
Facteur de convergence.....	σ
Dans les dérivations.....	$\frac{d}{dt} \rightarrow p \rightarrow j\omega$
Dans les intégrations.....	$\int dt \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow \frac{1}{j\omega}$
Transformée Fourier de $f(t)$	$F(j\omega) = \mathcal{F}f(t)$
Transformée Laplace de $f(t)$	$F(p) = \mathcal{L}f(t)$
Fonction de transfert isochrone.....	$W(j\omega) = G(j\omega) e^{j\theta(j\omega)}$
Fonction de transfert isomorphe.....	$W(p) = G(p) e^{j\theta(p)}$

Fonction de transfert d'un système asservi en boucle ouverte (f. de tr. à b. o.)...	$T(p)$
Fonction de transfert d'un élément en chaîne directe.....	$\mu_1(p), \mu_2(p), \dots$
Fonction de transfert d'un élément en chaînes de réaction.....	$\beta_1(p), \beta_2(p), \dots$
Désignation de gain.....	$G(p)$
Désignation de phase.....	$\Phi(p)$
Grandeur d'entrée d'un système.....	x
Grandeur de sortie d'un système.....	y
Grandeur libre ou perturbations.....	z
Erreur.....	ε
Pulsation de coupure de $T(p)$	$\omega_{co} (s^{-1})$
Première pente du gain $G(j\omega)$ de $T(j\omega)$	r_1 (dB/oct)
Pente aux environs de ω_{co}	r_{co} (dB/oct)
Marge de gain.....	M (dB)
Marge de phase.....	N (degré)
Erreur statique.....	ε_s
Erreur dynamique.....	ε_d
Facteur d'amortissement.....	ξ

GRANDEURS PHYSIQUES.

Les lettres majuscules N, L, \dots indiquent les grandeurs elles-mêmes.
 L'indice n indique l'état de régime normal.
 Les lettres minuscules n, l, \dots indiquent les valeurs relatives.
 La lettre grecque Δ indique l'écart par rapport au régime normal.
 Les lettres grecques minuscules ν, λ, \dots indiquent les écarts relatifs.

1° *Grandeurs physiques principales.*

Vitesse angulaire du groupe.....	N (t/mn)
Valeur du régime normal.....	N_n, N
Valeur relative de N	$n = \frac{N}{N_n}$
Écart par rapport au régime normal.....	$\Delta N = N - N_n$
Écart relatif de N	$\nu = \frac{\Delta N}{N_n} = n - 1$
Course du tiroir de distribution (T-D).....	$S, S_n, s, \Delta S, \sigma$
Course du servomoteur à huile (S-M) (vannage).....	$L, L_n, l, \Delta L, \lambda$
Pression de l'eau au vannage.....	$H, H_n, h, \Delta H, \xi$
Puissance motrice de l'eau.....	$P_m, P_{mn}, p_m, \Delta P_m, \sigma_m$
Couple-moteur du groupe.....	$C_m, C_{mn}, c_m, \Delta C_m, \gamma_m$

2° *Grandeurs physiques auxiliaires.*

Phase ou heure synchrone.....	$\alpha = \int N dt = \frac{N}{p}$
Accélération de la vitesse angulaire.....	$\gamma = \frac{d}{dt} N = N\rho$
Débit de l'eau au vannage.....	$Q, Q_n, q, \Delta Q, h$
Vitesse d'écoulement de l'eau au vannage.....	$V, V_n, v, \Delta V, \eta$
Couple résistant du groupe.....	$C_r, C_{rn}, c_{rn}, \Delta C_r, \gamma_r$
Couple équivalent de la charge électrique.....	$C_e, C_{en}, c_{en}, \Delta C_e, \gamma_e$
Abscisse relative du point courant de la conduite.....	z

ÉLÉMENTS PHYSIQUES.

1° *Désignation de ces éléments.*

(Celle de leur fonction de transfert entre parenthèse.)

Turboalternateur.....	Tu-Al (μ_2)
Tachymètre.....	Ta
Tiroir de distribution et servomoteur.....	T-D/S-M (μ_1)
Système d'alimentation.....	Al (μ_2)
Statisme permanent.....	S (β_s)
Statisme temporaire.....	S-Tp (β_t)
Accéléromètre.....	Ac

Détecteur de dérivée seconde de vitesse.....	D 2/dc (μ_n)
Intégrateur.....	Ig (μ_i)
Manomètre simple.....	Ms (β_{ms})
Manomètre différentiel.....	Md (β_{md})
Manomètre à dérivée.....	Mh (β_h)
Préamplificateur.....	Pré-A
Électrovalve.....	E-V
Pont de résonance.....	P
Réseau de coefficient de transfert.....	R _{ct}
Alternateur pilote.....	A _p

2° Paramètres de ces éléments.

Valeurs limites de la course de T-D (valeurs relatives).....	$\pm s_m = \pm \frac{S_m}{S_n}$
Courses limites du vannage (valeurs relatives).....	$\pm l_m = \pm \frac{L_m}{L_n}$
Temps de manœuvre, pour $\pm L_m$ avec vitesse maximum de manœuvre.....	τ (s)
Pente de la courbe puissance/vannage sans effets de bélier.....	$K (\neq 1)$
Coefficient de transmission à travers l'ensemble T-D, S-M et Ali.....	$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau s_m K} (s^{-1})$
Couple du régime normal.....	$C_n = C_{mn} = C_{rn}$
Moment d'inertie des masses tournantes.....	J
Temps de lancer du groupe.....	$T = \frac{J N_n}{C_n} (s)$
Pente de la courbe couple-moteur/vitesse.....	α_m
Pente de la courbe couple résistant/vitesse.....	α_r
Coefficient d'autoréglage.....	$\alpha = \alpha_r - \alpha_m$
Degré du statisme permanent.....	δ
Constantes des ressorts du dash-pot.....	K_r
Viscosité du dash-pot.....	τ'' (s)
Statisme temporaire.....	δ'
Dosage accélérométrique.....	m
Longueur totale de la conduite.....	Z (m)
Célérité de l'onde.....	$a (\neq 1000 \text{ m/s})$
Accélération de la pesanteur.....	g
Constante d'Alliévi.....	$\varphi_a = \frac{\alpha V_{\max}}{g H_n}$
Demi-période de résonance de la conduite.....	$T'' = \frac{2Z}{a} (s)$
Caractéristique de la conduite.....	$\theta = \frac{\sum Z_i V_i}{g H_n} (s)$
	$(\theta = \varphi_a T')$
Rendement de la turbine.....	φ
Viscosité du servomoteur intégrateur.....	τ_i (s)
Dosage du détecteur de dérivée seconde.....	n (s ²)
Dosage du manomètre simple.....	K_{ms}
Dosage du manomètre différentiel.....	K_{md}
Dosage de la contre-réaction de puissance motrice (cas Daniel 3).....	K_p
Dosage du détecteur de dérivée de pression.....	τ_m (s)

Les éléments P, Pré-A, E-V, ainsi que les tringleries mécaniques sont supposés à jouer un rôle statique pur (déphasage nul). L'élément R_{ct} est supposé à jouer un rôle dynamique pur (gain unité).

BIBLIOGRAPHIE.

- Réglage.*
- | | |
|--|--|
| <p>AILLERET (Pierre) :</p> <p>[1] <i>Le réglage de la fréquence et de la puissance</i> (Cours E. S. E., 1947).</p> <p>ALMÉRAS (Paul) :</p> <p>[2] <i>Régulation</i> (Cours de l'I. P. G.).</p> | <p>[3] <i>Influence de l'inertie de l'eau sur la stabilité d'un groupe hydroélectrique</i> (La Houille blanche, 1946).</p> <p>[4] <i>Caractéristiques des régulateurs</i> (La Houille blanche, 1947).</p> <p>[5] <i>Procédés d'amélioration des qualités de réglage des groupes hydroélectriques</i> (La Houille blanche, 1949).</p> |
|--|--|

BERGERON :

- [6] *Complexité du phénomène du coup de bélier...* (La Houille blanche, 1949).

CAYÈRE (L'Abbé P.) :

- [7] *Les régulateurs de vitesse des turbines hydrauliques.*

CAHEN (F.) :

- [8] *Quelques considérations sur le réglage automatique de la fréquence et des échanges de puissances dans les réseaux* (Bull. Soc. franç. Électr., 1953, p. 59).
 [9] *Le réglage puissance-phase* (Bull. Soc. franç. Électr., 1953, p. 614).

CAHEN (F.) et CHEVALIER (A.) :

- [10] *Le réglage automatique de la fréquence dans les grands réseaux* (C. I. G. R. É., Rapport n° 339, 1954).

CONCORDIA et KIRCHMAYER (L. K.) :

- [11] *Tie line Power and Frequency control of electric power system* (Power Apparatus and Systems, juin 1953, p. 562).

DANIEL (R. P. J.) :

- [12] *Accélération du réglage de vitesse des turbines hydrauliques* (La Houille blanche, 1948, Thèse soutenue à l'Université de Grenoble).
 [13] *Le statisme des régulateurs et son élimination* (La Houille blanche, 1950, p. 15).

DARRIEUS (G.) :

- [14] *Réglage rationnel de la fréquence et de la répartition des charges entre centrales interconnectées* (Bull. Soc. franç. Électr., 1936).

DÉJOU :

- [15] *Considérations sur les régulateurs de groupe hydro-électrique de basse chute* (Rev. Gén. Électr., 1948, p. 315).

DUFF (C. K.) :

- [16] *Résultats expérimentaux concernant le réglage fréquence-puissance dans un grand réseau d'énergie interconnecté* (C. I. G. R. É., Rapport n° 303, 1954).

ESCLANGON (F.) :

- [17] *La stabilité des régulateurs de vitesse des groupes générateurs à courant alternatif* (Annales de l'I. P. G., 1954, n° 1, p. 3).
 [18] *Présentation d'un nouveau type de fréquencemètre* (Bull. Soc. franç. Électr., 1947).

FALLOU (J.) :

- [19] *Vue d'ensemble sur les systèmes de réglage automatique de la fréquence et de la puissance* (Bull. Soc. franç. Électr., 1936).

FALLOU (J.) et NASSE (G.) :

- [20] *Réglage fréquence-puissance centralisé* (C. I. G. R. É., Rapport n° 315, 1939).

GADEN (D.) :

- [21] *Considérations sur le problème de la stabilité* (Lausanne, 1945).
 [22] *Étude de la stabilité d'un réglage automatique de vitesse par les diagrammes vectoriels* (Lausanne, 1947).

- [23] *A propos du réglage automatique de vitesse des turbines hydrauliques : influence de certaines caractéristiques intervenant dans les conditions de stabilité* (La Houille blanche, 1948).

- [24] *Asservissement temporaire et accéléromètre* (Bulletin technique de la Suisse Romande, 1948, p. 61).

- [25] *Recherche d'une condition de stabilité, base de détermination des dispositifs amortisseurs de l'alternateur* (Centenaire de l'École Polytechnique de l'Université de Lausanne).

- [26] *Commentaires sur la condition de stabilité, amortisseurs de l'alternateur* (Bulletin technique de la Suisse Romande, 23 janvier et 6 février 1954).

- [27] *Considération sur la précision de réglage* (Bull. Soc. franç. Électr., 1952, p. 179).

GRANIER (J.) :

- [28] *Les régulateurs* (Dunod).

GUÉNOD :

- [29] *Influence des phénomènes de coup de bélier sur le réglage de vitesse des turbines hydrauliques* (La Houille blanche, 1949).

- [30] *Régleur électrique Brown-Boveri* (La Houille blanche, 1950).

- [31] *Analyse de la tenue de la fréquence d'un réseau par la méthode impulsionnelle* (C. I. G. R. É., Rapport n° 316, 1954).

- [32] *Contrôle des réglages de puissance d'échange entre réseaux électriques interconnectés* (Bull. Soc. franç. Électr., mars 1954).

HEDSTROM, LÖF, ALSTRÖM et GARDE :

- [33] *La régulation électrohydraulique des turbines hydrauliques* (C. I. G. R. É., Rapport n° 315, 1950).

- [34] *Un régulateur électrique pour turbines hydrauliques* (Revue A. S. E. A., mars-mai 1953).

KELLER (R.) :

- [35] *Nouveaux procédés de réglage fréquence-puissance en service d'exploitation* (Revue Brown-Boveri, 1944).

- [36] *Contribution au réglage de la fréquence et de la puissance des grands réseaux* (C. I. G. R. É., Rapport n° 316, 1954).

NASSE (G.) :

- [37] *Le réglage automatique et la répartition économique des charges* (Bull. Soc. franç. Électr., 1946).

- [38] *Étude de la stabilité de réglage de vitesse d'un groupe hydroélectrique* (Bull. Soc. franç. Électr., 1951).

RIBAU (A.) :

- [39] *Régulateur de vitesse* (Genève, 1948).

SAINT-JOANIS (A.) :

- [40] *Étude d'un nouveau fréquencemètre. Application au réglage fréquence-puissance* (Annales de l'I. P. G., 1953).

WHERTHMANN :

- [41] *Du réglage fréquence-puissance* (Revue Brown-Boveri, 1939).

Analyse. Servomécanisme.

ANGOT :

- [42] *Compléments de mathématiques* (Revue de l'Optique

BODE :

- [43] *Network analysis and Feedback amplifier design* (New York, 1945).

BROWN et CAMPBELL :

- [44] *Principles of Servomechanism* (U. S. A., 1948).

CHESTNUT et MAYER :

- [45] *Servomechanism and regulating system designs*, vol. I et II (John Wiley and Sons, New York, 1951 et 1955).

DANIEL (R. P. J.) :

- [46] *Sur les limites de stabilité des régulateurs électroniques ou mécaniques* (1950, non publié).

HAZEN (H. L.) :

- [47] *Theory of Servomechanism* (*Journal of Franklin Institute*, 1934, p. 279).

JAMES, NICHOLS et PHILLIPS :

- [48] *Theory of Servomechanism* (*Radiation Laboratory Series, M. I. T.*, 1947).

KUNTZMANN, DANIEL et MA :

- [49] *Stabilité des systèmes de réglage. Méthode d'étude* (*Rev. Gén. Électr.*, 1952).

LEHMANN (G.) :

- [50] *Servomécanismes* (*Analyses, synthèse et position actuelle*) (Sedes, 1947).
 [51] *Précision maximum des servomécanismes parfaitement stables* (*Onde Électrique*, 1950, p. 267).
 [52] *Les dynamos amplificatrices* (*Bull. Soc. franç. Électr.* 1952).
 [53] *Systèmes électriques dans les servomécanismes*.

LIBOIS :

- [54] *Systèmes hydrauliques et électrohydrauliques dans les servomécanismes* (*Méc. Ind.*, n° 1, 1954).

NASLIN :

- [55] *Théorie simplifiée des systèmes asservis* (*Mesures*, 1951).
 [56] *Les systèmes asservis* (*Revue d'Optique*, 1950).

NEWTON et WHITE :

- [57] *Laboratory aids for electromechanical system developments* (*Trans. A. I. E. E.*, 1947, p. 315).

NYQUIST :

- [58] *Regenerative Theory* (*Belle Telephone Tech. Journal*, 1932).

TARPLAY (K. L.) :

- [59] *An instrument to measure servomechanisms performance* (*Rev. Sc. Instr.*, vol. 18, 1947, p. 39).

THALER et BROWN :

- [60] *Servomechanism Analysis* (McGraw-Hill, 1953).

VALENTIN :

- [61] *Les dynamos amplificatrices et amplidyne* (*Bull. Soc. franç. Électr.*, 1948).

*Calculs analogiques.**Théorie informationnelle. Non-linéarité.*

KOCHENBURGER :

- [62] *A frequency method for analyzing and synthesizing contactor servomechanisms* (*Trans. A. I. E. E.*, 1949).

KOENIG (E. C.) et SCHALTZ (W. C.) :

- [63] *How to select governor parameters with analog computer* (*Control Engineering*, décembre 1954).

KORN et KORN :

- [64] *Electronic Analog Computers* (McGraw-Hill, 1952).

LOEB :

- [65] *La Cybernétique* (*C. O. E.*, décembre 1951).

MAYER :

- [66] *Comportement et stabilité des régulateurs automatiques contenant les éléments non linéaires* (*La Houille blanche*, 1952 à 1953).

MINORSKY :

- [67] *Non linear Mechanics* (New York, 1948).

PERETZ :

- [68] *Calculateur analogique électronique* (*Revue E.*, vol. 1, nos 7 et 8, 1955, S. B. E.).

RAYMOND :

- [69] *Sur la réalisation d'un coefficient de transfert donné* (*Onde Électrique*, février 1955).

SOROKA :

- [70] *Analog Methods in Simulation and Computation* (McGraw-Hill, 1955).

TRIMMER :

- [71] *Response of Physical systems* (U. S. A., 1950).

WIENER :

- [72] *Cybernetics* (New York, 1951).


DEUXIÈME THÈSE



PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ



Oscillations de relaxation



Vu :

Grenoble, le 28 octobre 1954

LE PRÉSIDENT DE LA THÈSE,

F. ESCLANGON

Vu et approuvé :

Grenoble, le 28 octobre 1954.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

L. MORET

Vu et permis d'imprimer :

Grenoble, le 28 octobre 1954.

LE RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE GRENOBLE.

LE VICE-PRÉSIDENT DU CONSEIL DE L'UNIVERSITÉ,

H. PARISELLE



PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
Quai des Grands-Augustins, 55.
148947-55

Dépôt légal Imprimeur, 1955, n° 1087.