Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 79 (1953)

Heft: 17

Artikel: Essai de stabilisation du réglage d'un groupe hydroélectrique muni de chambre d'équilibre

Autor: Cuénod, Michel / Gardel, André

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-59804

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: 14.01.2026

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

79e année 22 août 1953 N° 17

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les quinze jours

Abonnements :
Suisse : 1 an, 24 francs
Etranger : 28 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 20 francs
Etranger : 25 francs
Prix du numéro ; Fr. 1.40
Abonnements et nos isolés par versement au cpte de ch. postaux Bulletin technique de la Suisse romande N° II. 5775, à Lausanne.

Rédaction
et éditions de la S. A. du Bulletin technique (tirés à part), Case Chauderon 475

Administration
Ch. de Roseneck 6 Lausanne

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des Anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

Comité de patronage — Président : R. Neeser, ingénieur, à Genève ; Vice-président : G. Epitaux, architecte, à Lausanne ; Secrétaire : J. Calame, ingénieur, à Genève — Membres, Fribourg : MM. P. Joye, professeur ; † E. Lateltin, architecte — Vaud : MM. F. Chenaux. ingénieur ; † H. Matti, ingénieur ; E. d'Okolski, architecte ; Ch. Thévenaz, architecte — Genève : MM. † L. Archinard, ingénieur ; Cl. Grosgurin, architecte ; E. Martin, architecte ; V. Rochat, ingénieur — Neuchâtel : MM. J. Béguin, architecte ; R. Guye, ingénieur — Valais : MM. J. Dubuis, ingénieur ; D. Burgener, architecte.

Rédaction : D. Bonnard, ingénieur. Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration
de la Société anonyme du Bulletin technique : A. Stucky, ingénieur, président; M. Bridel ; G. Epitaux, architecte ; R. Neeser, ingénieur.

Tarif des annonces

1/1 page	Fr.	264.—
1/2 »	»	134.40
1/4 »	»	67.20
1/8 »	»	33.60

Annonces Suisses S. A. (ASSA)

Rue Centrale 5. Tél. 22 33 26
Lausanne et succursales

SOMMAIRE : *Essai de stabilisation du réglage d'un groupe hydroélectrique muni de chambre d'équilibre*, par MICHEL CUÉNOD, ingénieur EPF, et ANDRÉ GARDEL, ing. EPUL, lic. ès sc. — DIVERS. — NÉCROLOGIE. — LES CONGRÈS : *IIIe Congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondation.* — BIBLIOGRAPHIE. — SERVICE DE PLACEMENT. — NOUVEAUTÉS, INFORMATIONS DIVERSES. — DOCUMENTATION GÉNÉRALE. — DOCUMENTATION DU BATIMENT.

COMMUNICATION DU LABORATOIRE D'HYDRAULIQUE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE LAUSANNE

Directeur : M. le professeur A. STUCKY. — Directeur-adjoint : M. le professeur D. BONNARD

ESSAI DE STABILISATION DU RÉGLAGE D'UN GROUPE HYDROÉLECTRIQUE MUNI DE CHAMBRE D'ÉQUILIBRE[1]

par

MICHEL CUÉNOD et ANDRÉ GARDEL
Ingénieur EPF Ing. EPUL, lic. ès sc.

(Suite et fin) [2]

IV. Etalonnage des asservissements

A. Asservissement de la tension au niveau d'eau

Le coefficient d'asservissement k_h est défini comme le rapport entre la variation relative du couple résistant de l'alternateur et la variation relative du niveau d'eau qui a provoqué cette variation de couple par le fait de l'asservissement.

A fréquence constante, la variation relative du couple résistant est proportionnelle à la variation relative de la puissance active débitée par l'alternateur, c'est-à-dire au carré de la variation relative de la tension.

$$k_h = \frac{\Delta m_e}{\Delta h} = \frac{\Delta n}{\Delta h}.$$

L'asservissement de la tension au niveau d'eau a été réalisé par un rhéostat de 7,5 Ohm entraîné par un flotteur et placé en série dans le circuit de mesure du régulateur de tension. Deux combinaisons des gradins ont été utilisées entre le flotteur et le rhéostat.

Les résultats de cet étalonnage sont visibles sur la figure 16. Nous en déduisons les coefficients d'asservissement suivants avec $\lambda = 0{,}6$:

asservissement nul	$k_h = 0$
asservissement moyen	$k_h = 1{,}4$
asservissement maximum	$k_h = 2{,}0$

B. Asservissement de la tension à la fréquence

Dans les calculs on utilise le coefficient « a » de sensibilité des couples moteur et résistant, aux variations de la vitesse ; il a été défini au tableau III

$$a = \mathrm{tg}\alpha - \mathrm{tg}\beta.$$

Dans $\mathrm{tg}\alpha$ intervient le coefficient d'asservissement fréquence-tension k_u comme nous allons l'établir.

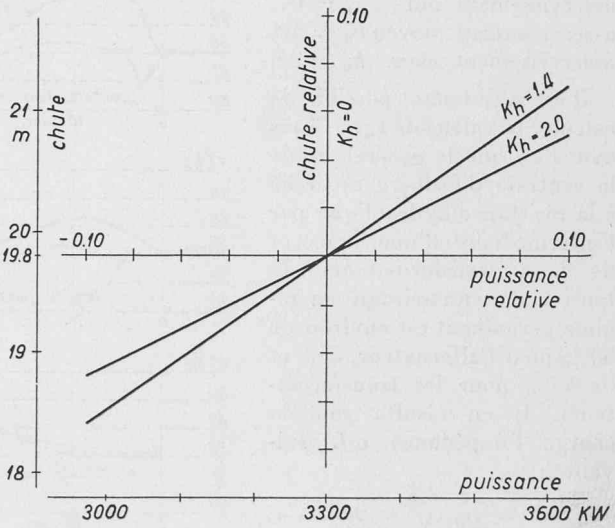

FIG. 16

Etalonnage de l'asservissement niveau d'eau - tension (sur les échelles en valeurs relatives, c'est 0,10λ qu'il faut lire ; l'étalonnage est fait pour λ = 0,6).

[1] Ce texte a paru également dans l'ouvrage que publia, en juin 1953, l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne, à l'occasion de son centenaire (Réd.)

[2] Voir *Bulletin technique* du 8 août 1953, p. 365.

La puissance débitée par l'alternateur est proportionnelle au produit du couple résistant par la vitesse Il en résulte :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{M_e}{M_{e0}} \frac{\omega}{\omega_0}$$ L'indice 0 correspond aux valeurs nominales.

En dérivant cette expression par rapport à la vitesse angulaire, nous obtenons, en valeurs relatives :

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{dN/N_0}{d\omega/\omega_0} - 1 .$$

Lorsque la tension est dépendante de la fréquence, la dérivée de la puissance par rapport à la vitesse angulaire est obtenue par une somme de deux dérivées partielles

$$\frac{dN/N_0}{d\omega/\omega_0} = \frac{\partial N/N_0}{\partial\omega/\omega_0} + \frac{\partial N/N_0}{\partial U/U_0}\frac{dU/U_0}{d\omega/\omega_0} .$$

Pour une charge ohmique et inductive, il est connu [11] que la dérivée partielle de la puissance par rapport à la vitesse angulaire, est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\partial N/N_0}{\partial\omega/\omega_0} = \frac{2\,\mathrm{tg}^2\psi}{\mathrm{tg}^2\psi - 1}$$

avec $\cos\psi$ = facteur de puissance de la charge.

D'autre part, lorsque la charge ne comprend pas de moteur, la puissance active est proportionnelle au carré de la tension

$$N/N_0 = (U/U_0)^2 .$$

Il en résulte que :

$$\frac{\partial N/N_0}{\partial U/U_0} = 2\,\frac{U}{U_0} = 2\lambda_u$$

avec $\lambda_u = \frac{U}{U_0}$ rapport de la tension moyenne à la tension de consigne.

Si nous introduisons ces différentes valeurs, et posons

$k_u = \frac{dU/U_0}{d\omega/\omega_0}$ coefficient d'asservissement fréquence-tension

nous obtenons :

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{2\,\mathrm{tg}^2\psi}{\mathrm{tg}^2\psi - 1} + 2\lambda_u k_u - 1 .$$

La détermination de k_u se fait par l'étalonnage fréquence-tension dont le résultat fait l'objet de la figure 17. Il en résulte les valeurs suivantes, avec $\lambda_u = 0{,}8$

asservissement nul $k_u = 0$
asservissement moyen $k_u = 1{,}1$
asservissement max. $k_u = 2{,}6$

Il est maintenant possible de calculer la valeur de $\mathrm{tg}\alpha$. Nous avons vu que le générateur de la centrale d'Oelberg est relié à la résistance hydraulique par l'intermédiaire d'une ligne et de deux transformateurs ; la tension de court-circuit en régime permanent est environ de 50 % pour l'alternateur, de 8 et de 4 % pour les transformateurs. Il en résulte pour la charge l'impédance ωL suivante :

$$\omega L = \frac{\varepsilon}{100}\,\frac{U_0^2}{N_0} = 0{,}62\,\frac{(3{,}6)^2}{7{,}5} = 1{,}1 \text{ ohm}$$

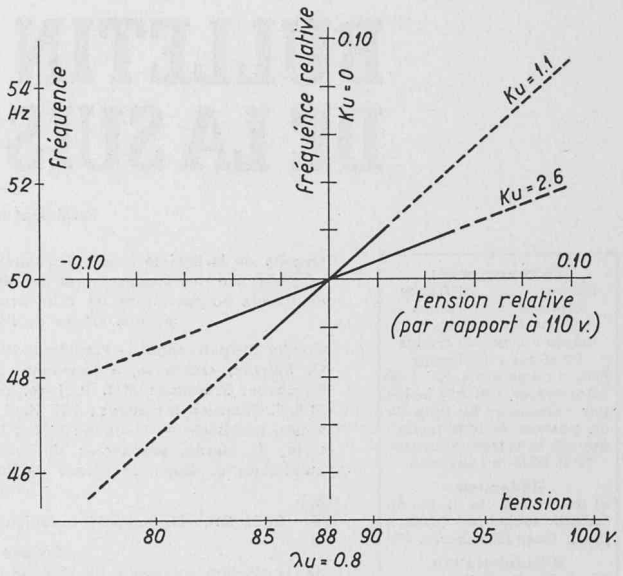

Fig. 17
Etalonnage de l'asservissement fréquence - tension.

avec U_0 = tension nominale = 3,6 kV
N_0 = puissance nominale = 7,5 MVA

D'autre part, pour une charge de 3,30 MW, la valeur de la résistance hydraulique est la suivante :

$$R = \frac{U^2}{N} = \frac{(3{,}6)^2}{3{,}3} = 3{,}9 \text{ ohm} .$$

Il en résulte le facteur de puissance suivant :

$$\cos\psi = \frac{3{,}9}{\sqrt{(3{,}9)^2 + (1{,}1)^2}} = 0{,}96$$

d'où : $\mathrm{tg}\psi = \frac{1{,}1}{3{,}9} = 0{,}28$

$$\frac{2\,\mathrm{tg}^2\psi}{\mathrm{tg}^2\psi - 1} = -0{,}17 .$$

Pour connaître a, il faut encore déterminer $\mathrm{tg}\,\beta$; la vitesse spécifique de la turbine de la centrale d'Oel-

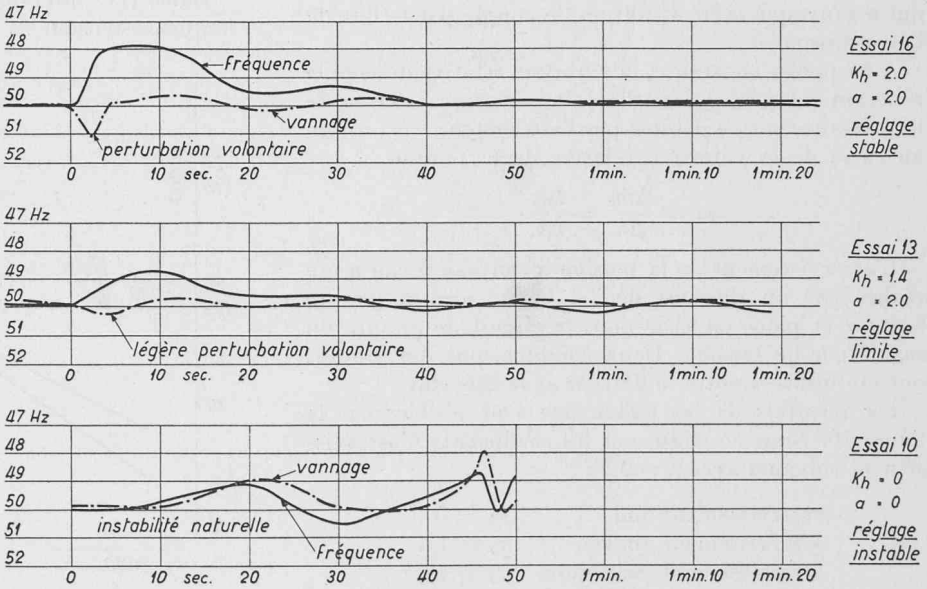

Fig. 18
Exemples d'oscillogrammes enregistrés.

berg étant égale environ à 500, on peut admettre en première approximation que $\operatorname{tg}\beta = -0{,}8$ [12]. Nous obtenons ainsi pour a les valeurs suivantes :

asservissement nul

$$a = -0{,}17 - 1 + 0{,}8 = \sim -0{,}4$$

asservissement moyen

$$a = -0{,}17 + 0{,}8.2.1{,}14 - 1 + 0{,}8 = \sim 1{,}5$$

asservissement maximum

$$a = -0{,}17 + 0{,}8.2.2{,}6 + 0{,}8 - 1 = \sim 3{,}8$$

Ces valeurs caractérisent des régimes permanents ; en fait, la valeur indiquée pour l'asservissement nul ne tient pas compte de l'asservissement passager naturel par suite de l'inertie du champ magnétique auquel nous avons fait allusion précédemment. D'autre part, par suite de l'inductivité de son système de mesure, le régulateur tension est toujours légèrement dépendant de la fréquence, aussi, en bonne approximation, peut-on admettre que lorsque l'asservissement est nul, le facteur a est également nul.

Il en résulte :

asservissement nul $a = 0$
asservissement moyen $a = 2{,}0$
asservissement maximum $a = 4{,}2$

V. Essais principaux (juin 1952)

A. Résultats expérimentaux

Les essais principaux, effectués en juin 1952, ont été exécutés de nouveau en branchant le groupe sur une résistance liquide. Ils peuvent être divisés en trois séries :

a) Essais avec chambre d'équilibre normale (section de 300 m², vantaux ouverts) en faisant varier la charge, le statisme du régulateur de vitesse et l'asservissement fréquence - tension, mais sans aucun asservissement niveau d'eau - tension (essais 1 à 3).

b) Essais avec chambre d'équilibre réduite (section de 7 m², vantaux fermés) avec charge de 2500 kW, en faisant varier les asservissements fréquence - tension et niveau d'eau - tension, mais le statisme du régulateur restant nul (essais 4 à 9).

c) Essais dans les mêmes conditions que b), mais avec charge de 3300 kW (essais 10 à 17).

Un écart de réglage initial était obtenu par une perturbation importante de l'ouverture de la turbine, réalisée en fermant le vannage d'environ 2/10 par action sur le limiteur d'ouverture. Il n'a toutefois pas été possible de réaliser à chaque essai la même perturbation initiale. En comparant les divers oscillogrammes par rapport à l'allure du phénomène (amplifié, entretenu, amorti) et par rapport à la rapidité d'amortissement, on peut néanmoins opérer une classification (fig. 18).

Nous allons auparavant préciser les conditions de chaque essai et les résultats obtenus, dans les trois tableaux suivants.

Tableau V

Essais de stabilisation n° 1 à 3, série a, chambre d'équilibre de 300 m² (vantaux ouverts)

N°	Charge kW	Statisme % δ	Asservissement Fréquence-tension a	Asservissement Niv. d'eau-tension k_h	Réglage observé
1	4200	0 à 5	2,0	0	instable
2	2500	0	0	0	stable
3	2500	0	4,2	0	stable

Tableau VI

Essais de stabilisation n° 4 à 9, série b, chambre d'équilibre de section réduite à 7 m² (vantaux fermés)

N°	Charge kW	Statisme % δ	Asservissement Fréquence-tension a	Asservissement Niv. d'eau-tension k_h	Réglage observé
4	2500	0	0	0	stable
5	2500	0	2,0	0	stable
6	2500	0	0	1,4	plus stable
7	2500	0	4,2	0	plus stable
8	2500	0	2,0	1,4	plus stable
9	2500	0	4,2	1,4	très stable

Tableau VII

Essais de stabilisation n° 10 à 17, série c, chambre d'équilibre de section réduite à 7 m² (vantaux fermés)

N°	Charge kW	Statisme % δ	Asservissement Fréquence-tension a	Asservissement Niv. d'eau-tension k_h	Réglage observé
10	3300	0	0	0	instable
11	3300	0	0	1,4	instable
12	3300	0	4,2	0	limite
13	3300	0	2,0	1,4	limite
14	3300	0	4,2	1,4	stable
15	3300	0	0	2,0	instable
16	3300	0	2,0	2,0	stable
17	3300	0	4,2	2,0	stable

Les résultats des 8 essais de la série c sont schématiquement groupés dans le diagramme de la figure 19.

On vérifie, dans le domaine de variation des paramètres, que :

1) la stabilité diminue lorsque la charge augmente

2) la stabilité augmente lorsque l'asservissement fréquence - tension augmente

3) la stabilité augmente lorsque l'asservissement niveau d'eau - tension augmente. Les essais n'ont pas été suffisamment nombreux pour montrer que la stabilité

est maximum pour une valeur optimum déterminée de cet asservissement.

Il apparaît en outre (essai 1) que le groupe est instable en marche normale (vantaux ouverts) sous charge ohmique élevée, même avec un statisme du régulateur de vitesse égal à 5 %. Cette instabilité est due aux caractéristiques du réglage de vitesse et non à celles de la chambre d'équilibre.

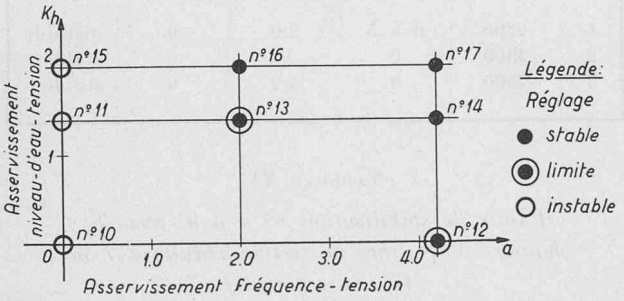

Fig. 19

Représentation schématique des résultats des essais de la série *c*.

Enfin, pour deux essais, nous nous sommes trouvés dans le cas d'oscillations entretenues, c'est-à-dire au voisinage de la limite de stabilité ; il s'agit des essais 12 et 13, de la série c, pour lesquels la période était de 20 à 30 secondes.

Le but principal de ces essais était de démontrer l'efficacité de dispositifs d'asservissement pour obtenir la stabilisation de la marche d'un groupe hydro-électrique. Malgré les conditions difficiles créées par la très forte réduction de la section de la chambre d'équilibre, ce but a été atteint. La comparaison des essais de la série *c* est particulièrement intéressante à ce sujet. En passant de l'essai 11 à l'essai 14 seul l'asservissement fréquence - tension a été modifié, passant de 0 à 4,2 ; le réglage, instable dans le premier cas, a été reconnu nettement stable dans le second. D'autre part, une constatation analogue peut être faite en comparant les essais 12 et 17 (ou 13 et 16) qui ne diffèrent que par l'augmentation de l'asservissement niveau d'eau - tension.

Cependant pour pouvoir tirer des conclusions numériques précises valables pour d'autres cas et pouvant être utilisées pour l'établissement du projet d'une nouvelle centrale, il serait nécessaire de pouvoir procéder à des essais beaucoup plus complets, en faisant varier systématiquement chacune des grandeurs qui interviennent dans les conditions de stabilité. Mais il est très difficile de faire varier de façon progressive certaines de ces grandeurs, telles que la section de chambre d'équilibre. D'autre part on ne peut envisager d'interrompre le service normal d'une centrale par des essais de trop longue durée. C'est pourquoi il convient de confronter les résultats expérimentaux avec ceux que l'analyse mathématique peut donner, puis de généraliser les résultats obtenus par voie théorique.

B. Résultats théoriques

a) *Détermination des conditions de stabilité*

Nous avons déjà établi l'équation caractéristique relative à la marche d'un groupe avec chambre d'équilibre, compte tenu des caractéristiques dynamiques de son réglage de vitesse, mais dans l'hypothèse d'un réglage de tension idéal [6] (voir II. B ci-dessus). Pour tenir compte en outre des caractéristiques dynamiques du réglage de la tension, il faut multiplier le facteur d'asservissement k_h par la fonction de transfert de ce dispositif de réglage, fonction que nous avons déterminée dans le chapitre III. Pour ne pas augmenter l'ampleur des calculs, nous n'utiliserons que la première approximation de cette fonction de transfert. Nous avions obtenu :

$$\varphi_{vu} = \frac{1}{1 + sT_u}$$

avec T_u = constante de temps du réglage de la tension.

Le facteur $(1 - k_h)$ de l'équation caractéristique (8) doit ainsi être remplacé par le facteur

$$\left(1 - \frac{k_h}{1 + sT_u}\right).$$

L'équation caractéristique passe ainsi du 6e au 7e degré.

b) *Analyse dans le cas de la chambre avec section réduite*

Les essais qui ont conduit aux résultats les plus intéressants étant ceux de la série c, avec une charge égale à 60 % de la puissance nominale, soit 3300 kW, c'est pour cette valeur que nous avons fait les calculs, en utilisant les valeurs numériques du tableau III.

Il faut remarquer que les valeurs numériques des caractéristiques des régulateurs ne sont pas connues ici de manière très précise. Nous les avons donc choisies comme paramètres et avons cherché à apprécier l'influence de T_u et T_r sur les conditions de stabilité. Cependant nous avons toujours admis le même dosage accélérométrique m = 1 sec, car nous avons vérifié qu'une variation de la valeur de ce dosage, dans les limites de son indétermination, ne modifie pas les conditions de stabilité de manière appréciable.

1. *Influence de la constante de temps T_u du réglage de tension*

Nous avons admis une valeur $T_r = 1{,}5$ sec de la constante de temps du régulateur de vitesse, et avons fait le calcul des conditions de stabilité pour quatre valeurs de la constante de temps du réglage de la tension $T_u = 0$, 1, 2 et 4 secondes. Pour chacune de ces valeurs, et pour différentes valeurs du coefficient a, nous avons établi la famille de courbes de Leonhard obtenues en faisant varier le coefficient d'asservissement k_h. La figure 20 représente une telle famille de courbes, pour $T_u = 2$ sec et $a = 6$, k_h variant de -5 à $+7$. Par interpolation on peut déterminer la valeur de k_h correspondant à la limite de stabilité ; ainsi, dans le cas de la figure 20, on interpole d'une part entre les courbes $k_h = -3$ et -5, d'autre part entre les courbes $k_h = 5$ et 7 : le passage à l'origine se produirait pour $k_h = -4{,}2$ et 5,3.

Les valeurs limites de stabilité ainsi déterminées peuvent être reportées pour chaque valeur de T_u sur un graphique en a et k_h, où elles définissent une courbe limite. La figure 21 indique le résultat obtenu ; on vérifie que, pour $a = 6$ (cas de la figure 20) et $T_u = 2$ sec, on a bien $k_h = -4{,}2$ ou 5,3.

Les valeurs des asservissements correspondant à des points situés à droite de ces courbes assurent une

marche stable, tandis qu'à gauche de ces courbes on trouve la zone d'instabilité. Ainsi que l'étude précédente [6] l'avait montré, il existe un dosage optimum de l'asservissement niveau d'eau - tension ; c'est celui correspondant au point le plus à gauche des courbes.

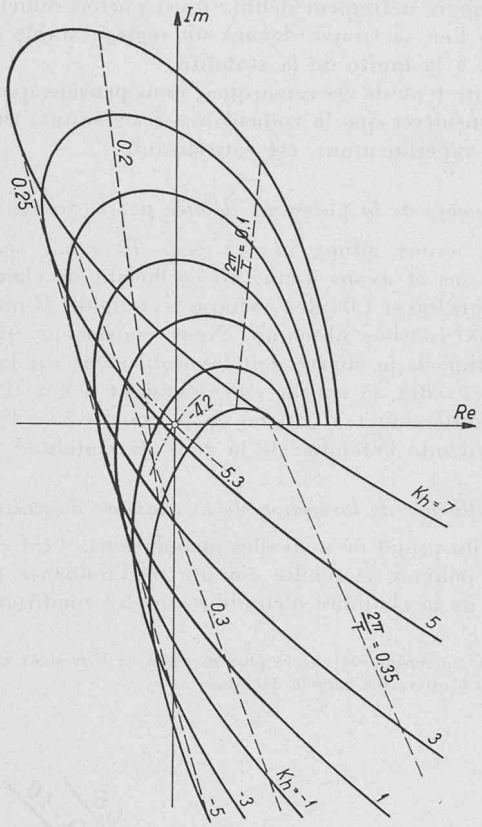

Fig. 20
Courbes de Leonhard pour $T_u = 2$ sec et $a = 6$ ($m = 1$ sec, $\delta = 0$ et $\lambda = 0{,}6$).

Rappelons que les mesures de la constante de temps T_u faites en marche à vide conduisaient à une valeur d'environ 4 secondes. Mais il est vraisemblable que lorsque la machine est en charge, la valeur de T_u se rapproche plutôt de 2 sec (voir ci-dessus § III. A. a).

On constate que, dans le cas du groupe étudié, et avec la chambre d'équilibre réduite à 7 m², la stabilité peut être obtenue par le seul asservissement fréquence - tension, tandis que le seul asservissement niveau d'eau - tension n'est pas susceptible d'amener la stabilité de la marche. Il ne s'agit toutefois pas là d'une conclusion générale.

Le déplacement vers le bas de la zone de stabilité, et sa rotation lorsque T_u augmente, peut être considéré comme l'effet de l'augmentation de la période propre du dispositif de réglage (tension et vitesse) du groupe due à la plus grande inertie du réglage de la tension.

2. *Influence de la constante de temps T_r du régulateur de vitesse*

Ayant admis les valeurs m = 1 sec et $T_u = 2$ sec, nous avons déterminé les conditions de stabilité pour trois valeurs de la constante de temps T_r du régulateur de vitesse : $T_r = 0{,}5$, 1 et 1,5 sec. Les courbes limites, dans le plan (a, k_h) sont représentées sur la figure 22. On vérifie qu'une réduction de T_r agit défavorablement sur la stabilité puisqu'elle correspond à une diminution de la zone de stabilité.

Il convient de remarquer que lorsque T_r décroit, la période propre du réglage de vitesse tend vers zéro et s'écarte de plus en plus de la période des oscillations du plan d'eau dans la chambre d'équilibre. On se rapproche

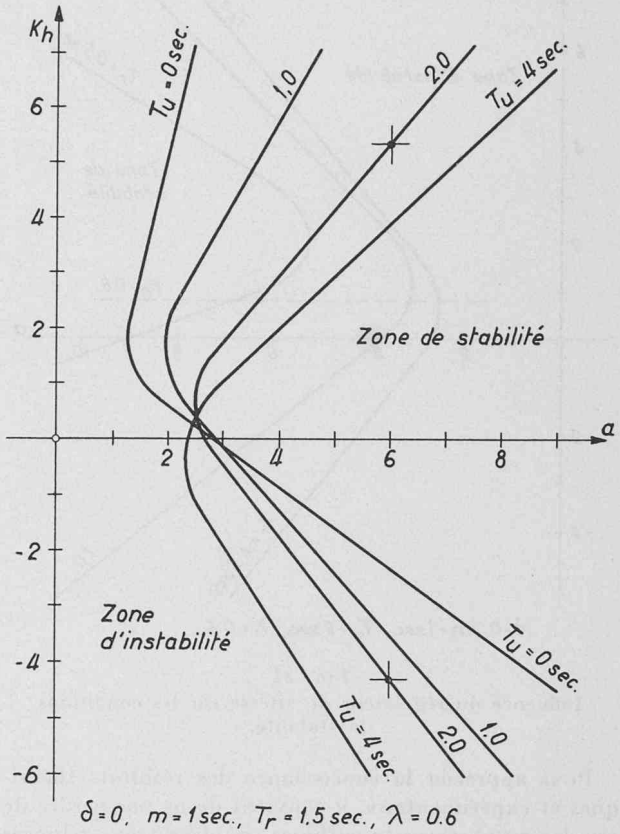

Fig. 21
Influence du réglage de la tension sur les conditions de stabilité.

donc du cas idéal où l'on peut étudier séparément la stabilité du réglage de vitesse et celle de la chambre d'équilibre, et correspondant aux hypothèses que nous avions admises en premier lieu [4]. La condition de stabilité de la chambre se réduit à $2p_0h_0 = 1 - k_h$ déjà obtenue [6]. Pour $F = 7$ m², nous obtenons $k_h = 0{,}8$. La branche inférieure des courbes limites tend donc vers l'horizontale indiquée en pointillé sur la figure 22 à l'ordonnée 0,8, et qui constitue le cas limite pour $T_u = T_r = \delta = 0$. Toutefois, il faut dire que simultanément la diminution de T_r entraîne une instabilité du réglage de vitesse du fait du coup de bélier, et la branche supérieure de la courbe limite s'abaisse : la surface de la zone de stabilité tend vers zéro.

Lorsque T_r augmente et tend vers l'infini, on se rapproche du cas du régulateur de vitesse bloqué. La stabilité de la chambre est assurée quels que soient les coefficients d'asservissement ; mais il n'en est pas de même de la stabilité de la marche du groupe, pour laquelle subsiste la condition $a > 0$ (la condition $a = 0$, exprime que les couples moteur et résistant sont égaux indépendamment de la fréquence). A la limite la zone de stabilité est donc formée par le demi-plan de droite.

3. *Comparaison avec les résultats expérimentaux*

Compte tenu de l'incertitude existant ici quant à la valeur exacte de T_r, T_u et m, les considérations qui pré-

cèdent permettent de définir une zone limite de stabilité dans le plan (a, k_h). Cette zone est représentée sur la figure 23. Nous y avons également reporté les résultats des essais 10 à 17.

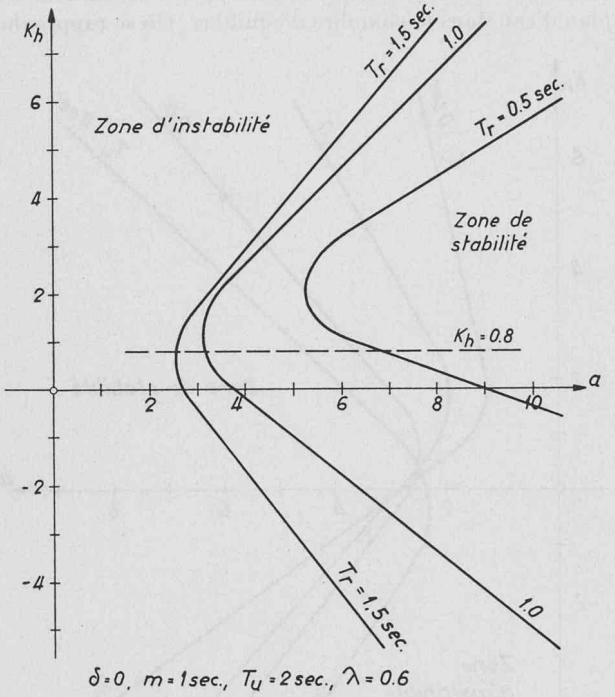

Fig. 22
Influence du régulateur de vitesse sur les conditions de stabilité.

Pour apprécier la concordance des résultats théoriques et expérimentaux, il convient de ne pas perdre de vue les nombreuses hypothèses simplificatrices admises à la base du calcul et imposées par la complexité du

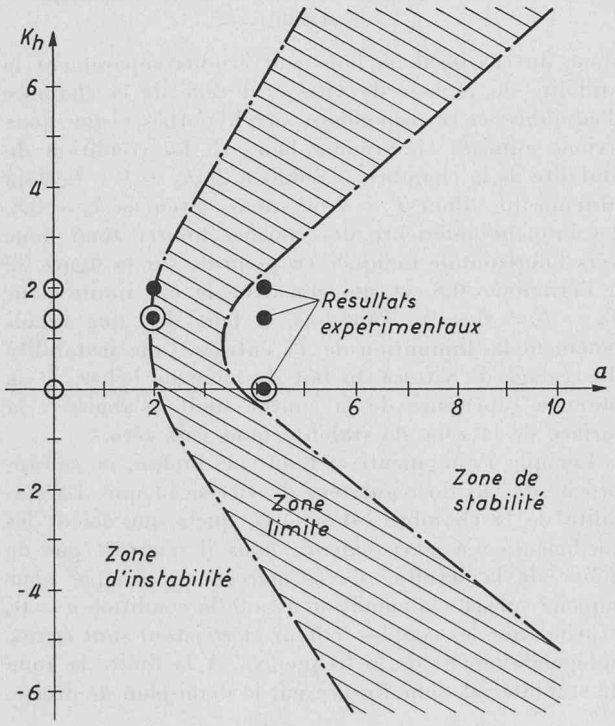

Fig. 23
Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux. (Légende : voir fig. 19.)

circuit de réglage ; en particulier l'approximation utilisée pour tenir compte de la caractéristique dynamique du réglage de la tension est assez grossière. En outre les valeurs numériques introduites sont rarement connues avec précision. D'autre part, dans l'examen des résultats expérimentaux, le caractère du réglage n'est pas toujours nettement défini : il est parfois difficile de juger si l'on se trouve devant un réglage stable ou si l'on est à la limite de la stabilité.

Compte tenu de ces remarques, nous pensons que l'on peut considérer que la coïncidence des résultats théoriques et expérimentaux est satisfaisante.

4. *Influence de la puissance débitée par le groupe*

Nous avons admis $m = 1$ sec, $T_r = 1{,}5$ sec, et $T_u = 2$ sec et avons donné au coefficient de charge λ les valeurs 0,6 et 1,0 (pleine charge). La figure 24 montre les deux courbes obtenues. Nous constatons qu'une diminution de la charge agit favorablement sur la stabilité : en effet, la courbe correspondant à $\lambda = 0{,}6$ est située entièrement à gauche de la courbe $\lambda = 1{,}0$, ce qui augmente l'étendue de la zone de stabilité [1].

c) *Influence de la section de la chambre d'équilibre*

Lors du projet de nouvelles installations, il est essentiel de pouvoir se rendre compte de l'influence de la section de la chambre d'équilibre sur les conditions de

[1] Cette conclusion est encore plus marquée si l'on tient compte de ce que λ intervient dans la définition de k_h.

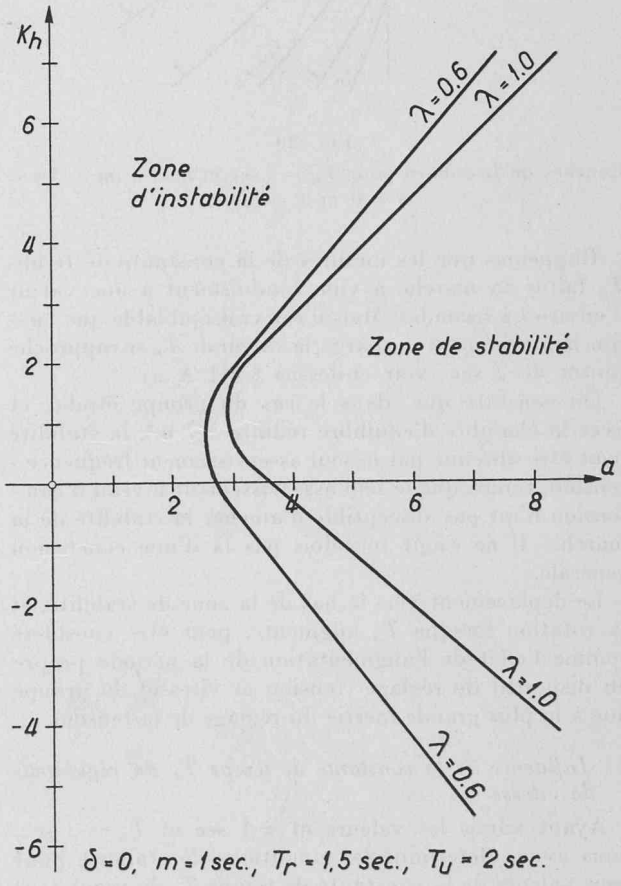

Fig. 24
Influence de la puissance débitée par le groupe sur les conditions de stabilité.

stabilité, compte tenu des dispositifs de stabilisation que nous avons proposés. Le calcul a été fait pour $m = 1$ sec, $T_r = 1{,}5$ sec, $T_u = 2$ sec, pour la pleine charge $\lambda = 1{,}0$, et en prenant comme paramètre différentes valeurs de la section de la chambre : $F = 7$ m², 40 m² (section de Thoma), 150m², 400 m² et ∞. Les résultats des calculs font l'objet de la figure 25. Nous voyons, comme il fallait s'y attendre, que plus la section de la chambre augmente, meilleures sont les conditions de stabilité. Pour une section de chambre infiniment grande, la courbe limitant la zone de stabilité dégénère en deux droites, l'une verticale à l'abscisse $a = 0{,}10$, l'autre horizontale à l'ordonnée $k_h = -9{,}2$. La verticale est donnée par les conditions de stabilité du réglage de vitesse ; elle correspond à une valeur positive de a à cause de l'effet faible, mais défavorable, du coup de bélier. Ce cas correspond à celui d'une centrale alimentée sans galerie d'amenée et sans chambre d'équilibre. La droite horizontale est donnée par la valeur de k_h pour laquelle on atteint la limite statique de stabilité : au-delà de cette limite il y a mouvement apériodique amplifié. Cette limite est indépendante de la section F.

Il est intéressant de remarquer que pour $F = 40$ m², qui est la section de Thoma, la courbe limite passe effectivement très près de l'origine ; le léger écart que l'on constate est le fait du réglage de vitesse et de tension du groupe.

La figure met en évidence qu'une réduction sensible de la section de la chambre d'équilibre peut être obtenue par l'introduction d'asservissements convenablement choisis.

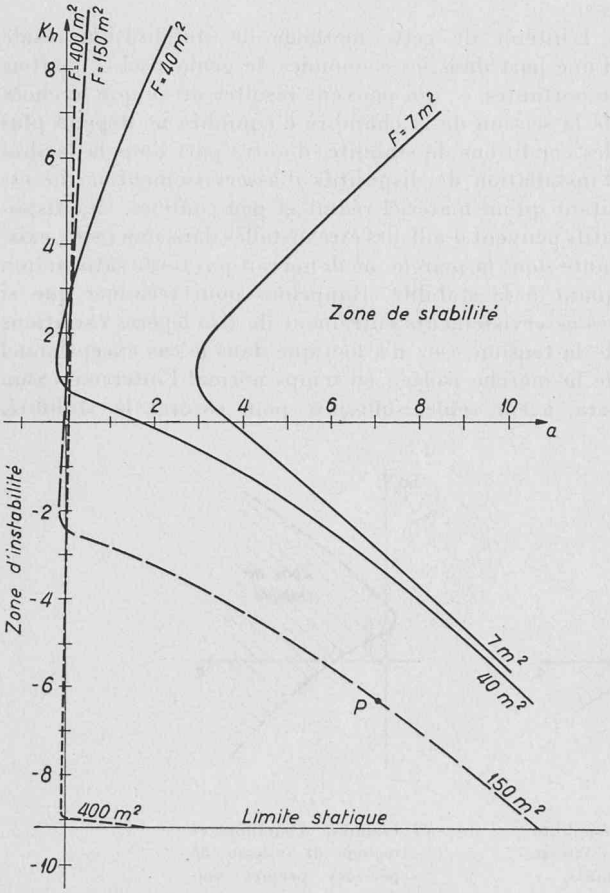

Fig. 25
Influence de la section de la chambre d'équilibre sur les conditions de stabilité.

d) *Cas de la chambre d'équilibre normale, de 300 m² de section*

Lorsque les vantaux situés à la base du puits de la chambre d'équilibre sont ouverts, on peut admettre en bonne approximation que, lors de petites oscillations, les plans d'eau dans le puits et dans la chambre sont constamment aux mêmes niveaux. La chambre d'équilibre a une section totale de 300 m², relativement très grande : elle joue donc pratiquement le même rôle pour le réglage de vitesse qu'une chambre de section infinie (on en veut pour preuve l'allure de la courbe correspondant à $F = 400$ m² dans le graphique de la figure 25).

Les essais avec vantaux ouverts ont montré que la stabilité dépendait de la charge du groupe. C'est pourquoi nous avons déterminé la valeur de a correspondant à la limite de stabilité, pour un coefficient de charge λ

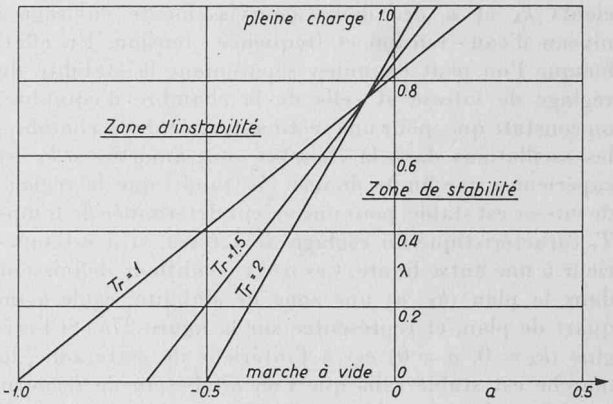

Fig. 26
Influence de la puissance dans le cas d'une chambre infiniment grande.

variable, dans l'hypothèse d'une section de chambre infiniment grande et avec les mêmes valeurs numériques que précédemment. La figure 26 obtenue montre que pour des charges partielles, une marche stable peut être obtenue pour une valeur de a nulle ou même négative. Mais à pleine charge il est nécessaire d'avoir a positif ; lorsque la charge est ohmique, ceci peut être réalisé par l'introduction d'un asservissement fréquence - tension.

VI. Considérations finales

Les essais exécutés avec un groupe de 7500 CV de l'usine hydroélectrique de l'Oelberg des Entreprises Electriques Fribourgeoises étaient destinés à l'étude de la stabilisation du réglage par l'introduction d'asservissements de la tension au niveau d'eau dans la chambre d'équilibre et à la fréquence. Ces essais, réalisés en chargeant le groupe sur une résistance hydraulique peuvent être considérés comme satisfaisants : ils ont permis d'obtenir une marche nettement stable avec une section de la chambre d'équilibre réduite à 7 m², alors même que le régulateur de vitesse n'était pas réglé pour assurer une marche stable avec une chambre de 300 m².

Dans le but de rendre possible une généralisation des résultats obtenus, nous avons procédé parallèlement à une étude théorique du réglage. A cet égard, les conditions rencontrées ont été particulièrement sévères, la période propre des oscillations dans la chambre d'équilibre étant très voisine de celle du réglage de vitesse. Il n'était donc plus admissible de considérer séparément

les conditions de stabilité de la chambre et du groupe, mais il était nécessaire d'étudier l'ensemble de l'aménagement depuis la galerie d'amenée jusqu'au réseau. Il en est résulté des complications de calcul importantes et celui-ci n'a été pratiquement possible qu'en faisant usage d'hypothèses simplificatrices. Nous pensons néanmoins que l'analyse rend bien compte des phénomènes observés. La comparaison des résultats des essais et de ceux de l'analyse est satisfaisante (fig. 23) surtout si l'on tient compte que plusieurs grandeurs, et parmi les plus importantes, étaient mal connues.

Nous avons cherché à mettre en évidence l'effet sur la stabilité d'une diminution de la charge du groupe ou d'une augmentation de la section de la chambre d'équilibre. Il est particulièrement intéressant d'examiner l'allure de la courbe correspondant à la limite de stabilité dans un plan où les coordonnées sont les coefficients k_h et a des deux asservissements envisagés : niveau d'eau - tension et fréquence - tension. En effet, lorsque l'on peut examiner séparément la stabilité du réglage de vitesse et celle de la chambre d'équilibre, on constate que, pour une section donnée de la chambre, les oscillations dans la chambre sont amorties si k_h est supérieur à une limite donnée [4], tandis que le réglage de vitesse est stable, pour une valeur déterminée du temps T_r caractéristique du réglage de vitesse, si a est supérieur à une autre limite. Ces deux conditions définissent dans le plan (k_h, a) une zone de stabilité, égale à un quart de plan, et représentée sur la figure 27a. Si l'origine ($k_h = 0$, $a = 0$) est à l'intérieur de cette zone, la marche est stable sans que l'on ait besoin de recourir à un asservissement. Mais si l'origine est hors de la zone, la stabilité de marche n'est plus assurée, soit du fait de la chambre d'équilibre (si k_h limite est positif) soit du réglage de vitesse (si a limite est positif) soit des deux ensemble. La stabilité pourra être rétablie par l'usage d'un asservissement niveau d'eau - tension dans le premier cas, ou fréquence - tension dans le deuxième cas, ou les deux ensemble[1]. Mais on voit clairement que si l'instabilité provient de la chambre, l'asservissement fréquence - tension sera inopérant, et vice versa.

Lorsque la période des oscillations dans la chambre d'équilibre se rapproche de la période propre du réglage de vitesse, ces deux éléments ne sont plus entièrement indépendants. La courbe limite dans le plan (k_h, a) change progressivement de forme. Si l'origine est située hors de la zone de stabilité, celle-ci pourra de nouveau être rétablie par l'usage d'un asservissement ; mais le choix de cet asservissement ne sera plus aussi exclusif que dans le cas précédent. Néanmoins si l'instabilité est plus particulièrement due à la chambre (cas de la figure 27b), elle sera plus aisément corrigée par un asservissement niveau d'eau - tension. La marche stable pourra ainsi être obtenue avec de plus faibles variations de la tension que si l'on désirait réaliser la stabilité uniquement par un asservissement fréquence - tension.

Toutefois, les meilleures conditions de stabilisation seront obtenues en cumulant l'effet des deux asservissements, convenablement dosés. Cette conclusion est encore accentuée si les périodes de la chambre et du réglage de vitesse deviennent très voisines (cas des essais). La courbe limite prend alors l'allure indiquée sur la figure 27c.

La méthode de calcul établie pour l'analyse des essais, et présentée dans cette étude, doit en particulier, permettre l'examen des conditions de stabilité de marche lorsque la chambre d'équilibre et le réglage de vitesse ne peuvent plus être considérés comme indépendants ; il peut alors arriver que la section de Thoma perde toute signification. La marche pourra néanmoins être rendue stable par l'emploi d'asservissements de la tension soit à la fréquence, soit au niveau d'eau dans la chambre. Le meilleur effet de stabilisation résultera du choix judicieux des asservissements et de leur dosage en fonction des conditions particulières de chaque cas.

L'intérêt de cette méthode de stabilisation réside d'une part dans les économies de génie civil — parfois importantes — qui peuvent résulter de ce que le choix de la section de la chambre d'équilibre ne dépend plus des conditions de stabilité, d'autre part dans la facilité d'installation de dispositifs d'asservissement ne nécessitant qu'un matériel réduit et peu coûteux. Ces dispositifs peuvent d'ailleurs être installés dans une usine existante dont la marche ne donnerait pas toute satisfaction quant à la stabilité. Rappelons pour terminer que si ces asservissements entraînent de très légères variations de la tension, ceci n'a lieu que dans le cas exceptionnel de la marche isolée ; en temps normal l'interconnexion sera, à elle seule, suffisante pour assurer la stabilité.

[1] Ceci est valable dans le cas défavorable où la consommation de la clientèle présente un caractère plus particulièrement ohmique. Lorsque la charge est constituée par des moteurs, la stabilité pourra être obtenue en asservissant la fréquence au niveau d'eau.

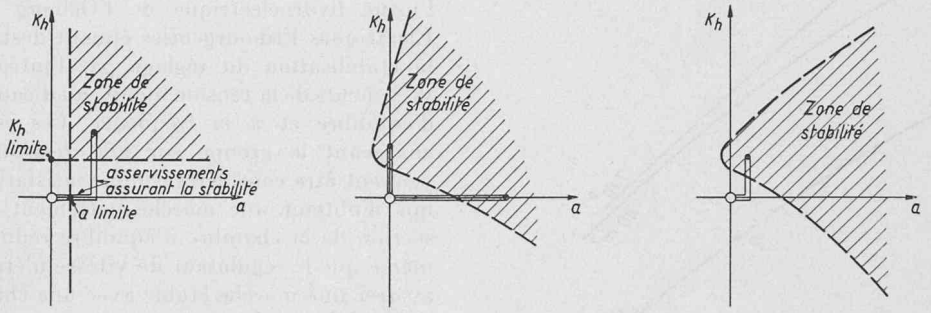

Fig. 27

a) Chambre d'équilibre et réglage de vitesse considérés comme indépendants.

b) Chambre d'équilibre et réglage de vitesse non indépendants.

c) Chambre d'équilibre et réglage de vitesse de périodes propres voisines.

Zone de stabilité et allure de la courbe limite suivant la valeur relative des périodes propres de la chambre et du groupe. Asservissements nécessaires pour obtenir la stabilité de la marche.

BIBLIOGRAPHIE RESTREINTE

[1] J. Calame et D. Gaden : *Théorie des chambres d'équilibre.* Ed. La Concorde et Gauthier-Villars, 1926.

[2] *Chambres d'équilibre.* Cours de M. le professeur A. Stucky. Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne.

[3] J. Calame et D. Gaden : *De la stabilité des installations munies de chambres d'équilibre.* Schweizerische Bauzeitung, 1927.

[4] M. Cuénod et A. Gardel : *Stabilisation des oscillations du plan d'eau des chambres d'équilibre.* Bulletin technique de la Suisse romande, 12.8.1950. Publ. EPUL nº 12.

[5] D. Gaden et L. Borel : *Influence de la variation de la puissance sur la condition de stabilité de Thoma.* Bulletin technique de la Suisse romande, nº 9, 1951. Publ. EPUL nº 15.

[6] M. Cuénod et A. Gardel : *Stabilité de la marche d'une centrale hydroélectrique avec chambre d'équilibre, compte tenu des caractéristiques dynamiques du réglage de vitesse.* Bulletin technique de la Suisse romande, 26.7.52. Publ. EPUL nº 24.

[7] R. Keller : *La stabilisation du réglage de la vitesse des groupes générateurs à charge indépendante de la fréquence.* Revue Brown Boveri, juin-juillet 1947.

[8] B. Hefti : *L'extension de l'usine hydroélectrique de l'Oelberg.* Bulletin technique de la Suisse romande, 3.10.42.

[9] M. Cuénod : *Etude des propriétés d'un réglage automatique.* Bulletin technique de la Suisse romande, 26.4 et 10.5.1947.

[10] M. Cuénod : *Contribution à l'étude d'un réglage automatique.* Bulletin de l'A. S. E., nº 18, 1950.

[11] M. Cuénod et A. Gardel : *Stabilisation de la marche de centrales hydroélectriques au moyen d'un asservissement de la charge électrique à la charge hydraulique.* Rapport CIGRE, nº 313, 1952.

[12] D. Gaden et P. Neeser : *Influence de certaines caractéristiques intervenant dans la condition de stabilité.* La Houille Blanche, mai-juin 1948.

Adresses des auteurs : *M. Michel Cuénod,* OFINCO, Cité 1, Genève ; *M. André Gardel,* avenue Warnery 13, Lausanne.

DIVERS

Nouvelle automotrice double d'excursion

Les demandes de trains et de véhicules spéciaux pour des courses d'excursion et des voyages en société sont très nombreuses aux Chemins de fer fédéraux, notamment pendant l'été. Quand les circonstances et le nombre des véhicules disponibles le permettent, on fournit pour ce trafic des flèches rouges ou des rames automotrices à deux ou trois éléments. Ce matériel, construit entre 1935 et 1939, était destiné à quelques exceptions près à un service régulier, non à des excursions. Par ailleurs, il ne répond plus entièrement au besoin de confort actuel. Dans les voitures et automotrices affectées aux voyages en société, par exemple, il a fallu installer des haut-parleurs pour diffuser de la musique et des communications. Il a fallu aussi commencer à transformer les automotrices — deux sur neuf le sont jusqu'à maintenant — pour donner plus de place et une plus grande liberté de mouvement à chaque voyageur. On profite de cette transformation pour modifier la disposition intérieure des compartiments et y rendre le séjour plus agréable. On arrive ainsi à avoir des véhicules satisfaisant aux grandes exigences du trafic touristique, tout au moins pour des courses dont le nombre des participants ne dépasse pas la soixantaine. Pour les sociétés plus grandes, on n'avait jusqu'ici que l'automotrice double présentée à l'Exposition nationale de Zurich. Ce véhicule, très demandé, n'était plus suffisant. Il fallait en construire d'autres.

Commande fut donc passée en février 1951 à la Fabrique suisse de wagons et d'ascenseurs S. A., à Schlieren, à la S. A. Brown, Boveri & Cie, à Baden, et à la S. A. des Ateliers de Sécheron, à Genève, de deux automotrices doubles, dont la première est sortie des ateliers de Schlieren le 4 juillet de cette année pour faire, le 6, ses premières courses d'essai. La seconde sera livrée à fin août.

L'automotrice double comprend deux voitures à quatre essieux, réunies par un attelage fixe. La composition mesure 46,9 m hors tampons et pèse 87 tonnes à vide ; elle est mue par quatre moteurs d'une puissance unihoraire totale de 1400 CV. Elle peut circuler à une vitesse maximum de 125 km/h et franchir, sans adjonction d'un véhicule moteur supplémentaire, des rampes de 38 ‰ au plus, ce qui revient à dire qu'elle peut pratiquement rouler sur toutes les lignes des Chemins de fer fédéraux et de la plupart des compagnies privées à voie normale. Sur des déclivités plus fortes, elle doit être attelée à un autre véhicule moteur. Contrairement aux précédentes flèches rouges, elle a à ses deux extrémités les appareils ordinaires de choc et de traction, qui augmentent sensiblement ses possibilités d'utilisation, puisqu'on peut lui ajouter des voitures. On peut aussi l'accrocher à d'autres automotrices et à des locomotives, donc l'atteler à n'importe quel train régulier. En plus du frein à air comprimé, elle possède le frein électrique sur résistances.

L'automotrice double offre 123 places assises. A chacune de ses extrémités se trouve un grand compartiment de vingt sièges rembourrés, groupés par deux et tournants, à dossier réglable. Au milieu, on a deux salons-fumoirs, ayant chacun dix-huit fauteuils amovibles, le buffet, une cabine de commande des haut-parleurs, deux lavabos et deux compartiments d'appareils électriques. Le buffet a ses armoires froides et à provisions, un réchaud électrique et un évier.

Par les fenêtres, très larges, la vue n'est en rien gênée. Les cloisons entre compartiments ont été autant que possible vitrées pour offrir un maximum de visibilité. La couleur des parois et de l'aménagement intérieur est agréable à l'œil. L'éclairage est fluorescent et le chauffage électrique à air pulsé. Ce dernier est automatique, de sorte que la température est constante au degré désiré. En été, l'installation de chauffage est utilisée pour la ventilation. Dans tous les compartiments, on peut régler ou arrêter les haut-parleurs à volonté. Le microphone de la cabine de transmission peut être aussi branché dans les deux cabines de mécanicien et au buffet.

La « flèche *rouge* » étant devenue le symbole du véhicule d'excursion, on a conservé cette couleur pour les parois extérieures.

Les Chemins de fer fédéraux pensent avoir fait là l'acquisition de deux véhicules propres à parfaire, sans excès de luxe, le plaisir d'un voyage en société. Ils offrent un confort qui doit donner satisfaction aux plus exigeants. Le voyageur appréciera tout particulièrement d'avoir assez d'espace pour lui et de pouvoir aller et venir à peu près comme il l'entend.