

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 79 (1953)
Heft: 16

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-59803>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

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

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 n°s isolés
par versement au cpte de
ch. postaux Bulletin techni-
que 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. Epitoux, 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. Grosgrin, 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. Epitoux, 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. — BIBLIOGRAPHIE. — SERVICE DE PLACEMENT. — DOCUMENTATION GÉNÉRALE. — DOCUMENTATION DU BATIMENT. — NOUVEAUTÉS, INFORMATIONS DIVERSES.

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'ÉQUILIBRE¹

par

MICHEL CUÉNOD
Ingénieur EPF

et ANDRÉ GARDEL
Ing. EPUL, lic. ès sc.

Avant-propos

L'incessant développement des aménagements hydro-électriques, la construction d'usines de plus en plus importantes, munies de groupes de puissance unitaire constamment accrue, donnent au problème du réglage un intérêt particulier. Il n'est, pour s'en convaincre, que de prendre garde aux très nombreuses publications faites à ce sujet dans toute la presse technique. Cet intérêt est dû à la complexité croissante des mécanismes du réglage utilisés, à la nécessité d'avoir toute garantie de marche stable, un fonctionnement instable étant d'autant plus difficile à corriger que la machine est plus grande. Mais cet intérêt provient également de deux autres causes, extérieures au problème : d'une part on ne dispose des moyens d'analyse mathématique et expérimentale adéquats que depuis peu d'années et d'autre part il s'agit d'une question touchant trois spécialités, électricité, mécanique et génie civil, conventionnellement séparées dans les études d'ingénieurs : l'abord du problème en est rendu plus difficile par la nécessité de travailler en équipe.

Ce sont précisément les résultats de recherches exécutées par un groupe de personnalités des trois spécialités citées, que nous avons intentionnellement choisies dans les milieux

divers de l'Ecole polytechnique, de l'Industrie et des exploitants d'usines hydroélectriques, qui sont donnés à cette communication.

MM. MICHEL CUÉNOD et ANDRÉ GARDEL auxquels incomba la tâche d'établir ce mémoire sont les auteurs de tous les développements théoriques mis à la base des essais relatés ici ou nécessaires à l'interprétation de leurs résultats ; ils ont été secondés pour les calculs numériques par M. SCHOPFER, ingénieur au Laboratoire d'hydraulique. Ils ont en outre joué un rôle déterminant dans l'établissement du programme et l'exécution des essais.

Nous avons nous-mêmes, ayant à nos côtés M. D. GADEN, professeur à l'E. P. U. L. et directeur des Ateliers des Charmilles, et M. PILLER, sous-directeur des Entreprises électriques fribourgeoises, assumé la direction et l'organisation, dans le cadre des recherches du Laboratoire d'hydraulique, des essais entrepris à l'Usine de l'Oelberg, à Fribourg. Pour cela, nous avons pu compter en outre sur l'appui de la Société Brown Boveri, à Baden² et de M. R. KELLER, ingénieur en chef à la dite Société, qui participe personnellement aux essais, ainsi que de la Société OFINCO, de Genève, qui mit aimablement à notre disposition M. Cuénod.

Ces essais demandèrent un personnel spécialisé nombreux, et les cadres du Laboratoire d'hydraulique ainsi

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 Qui mit à disposition divers appareils de mesure.

que les techniciens mis aimablement à notre service par M. MARRO, ingénieur adjoint à la direction technique des Entreprises électriques fribourgeoises, ne suffisant pas au contrôle de toutes les opérations, les Ateliers des Charmilles, à Genève, nous prêtèrent en outre leur concours en déléguant sur place MM. BOREL et ROUEL, ingénieurs.

C'est ainsi que fut réalisée, sur l'initiative et sous la direction de l'un des Instituts de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne, une communauté de travail qui conduisit à d'heureux résultats ; le fait exceptionnel et nouveau sur lequel il convient d'insister ici est la mise à disposition, par un exploitant, soit les Entreprises électriques fribourgeoises, d'une usine pendant de nombreuses heures aux seules fins de servir les intérêts d'une étude scientifique ; en effet, ces essais ne devaient être d'aucune utilité directe pour l'exploitant dont les installations fonctionnaient à son entière satisfaction, ils constituaient par contre une gêne évidente non seulement par immobilisation de l'usine pendant les expériences, mais par tous les travaux préparatoires nécessités par l'obligation de brancher le groupe étudié sur une résistance liquide située ailleurs sur le réseau de distribution dont il fallait modifier sensiblement certains appareils de connexion.

Le choix de l'usine de l'Oelberg s'imposait à plusieurs points de vue : la faible chute, environ 20 m, rend le réglage sensible aux oscillations du plan d'eau dans la chambre d'équilibre, le type différentiel de la chambre permet d'en réduire considérablement la section par obturation des orifices de communication entre puits et chambre, la puissance du groupe n'est pas trop élevée et peut être absorbée par une résistance liquide ; en outre les fournisseurs de l'appareillage électrique de réglage (BBC) et de la turbine (Charmilles) étaient ouverts à l'idée d'essais de stabilisation, et, condition sine qua non, l'exploitant (EEF) acceptait non seulement de mettre le groupe à disposition, mais encore n'élevait aucune objection à ce que soient installés dans la chambre d'équilibre un système spécial de vannage sur les orifices du dispositif différentiel, et les appareils d'enregistrement du niveau d'eau ; il participa même au montage de ces installations dont le coût fut couvert par le Laboratoire d'hydraulique lui-même.

Toutefois le choix de l'usine de l'Oelberg, motivé par les faits cités ci-dessus, a cependant conduit à une difficulté supplémentaire : la faible longueur de la galerie d'amenée (270 m) et la petite section du puits de la chambre d'équilibre (7 m²) donnent à l'adduction une période propre de l'ordre de 20 secondes, presque identique à celle — environ 18 secondes — du réglage de vitesse, de sorte qu'il y a eu résonance entre ces deux éléments. C'est dire que l'on était spécialement éloigné de l'indépendance admise en général dans les calculs. Mais cette difficulté une fois surmontée, on peut avec d'autant plus de confiance appliquer les résultats obtenus à des cas où la résonance est moins aiguë.

Les essais ont été effectués en deux séries, en décembre 1951 et juin 1952. Ils pourront encore être complétés en abordant d'autres aspects du problème du réglage.

Ils ont déjà, d'une part, suscité la mise au point d'une nouvelle analyse mathématique des phénomènes du réglage et, d'autre part, ils ont permis de contrôler les résultats obtenus analytiquement et de tirer quelques conclusions sur les possibilités de stabilisation offertes par des dispositifs d'asservissement de la tension, soit au niveau d'eau, soit à la fréquence.

D. BONNARD, professeur

Introduction

Les recherches exécutées jusqu'à présent dans le domaine du réglage des groupes hydroélectriques munis d'une chambre d'équilibre sont restées presque uniquement théoriques. En effet, étant donné la nature du problème, des études sur modèles réduits nécessitent certaines hypothèses qui limitent la portée des résultats ; des essais en vraie grandeur se heurtent à la difficulté de trouver un exploitant d'usine hydroélectrique qui accepte de mettre à disposition durant plusieurs jours un groupe moderne et d'une puissance suffisante.

Ces études théoriques ont en particulier porté sur la détermination de la section horizontale minimum à donner à la chambre d'équilibre [1, 2]¹ ; il est connu que si l'on admet que la puissance de l'usine est constante, il existe pour la chambre d'équilibre une section limite, au-dessous de laquelle la marche est instable : une manoeuvre du vannage des turbines provoque alors dans la chambre des dénivellements telles que l'oscillation du plan d'eau s'amplifie sous l'effet du réglage.

Cette section limite dépend toutefois de manière importante du degré d'interconnexion du réseau sur lequel l'usine débite son énergie. MM. Calame et Gaden ont montré en 1927 déjà [3] que si les autres centrales branchées sur le même réseau ont une puissance totale dépassant le double de celle de l'usine considérée, la stabilité de marche de celle-ci est assurée quelle que soit la section de la chambre d'équilibre.

Etant donné le développement croissant de l'interconnexion, cette condition est de plus en plus souvent remplie. Il semblerait donc que l'on puisse s'affranchir de l'obligation de donner à la chambre d'équilibre une section supérieure à la section limite mentionnée ci-dessus, obligation très onéreuse pour les basses chutes. Les dimensions de la chambre ne seraient plus alors déterminées que par la nécessité d'absorber l'oscillation en masse consécutive à une manoeuvre de grande amplitude du vannage.

Cependant, aucun exploitant n'est certain que son usine ne travaillera jamais sur réseau séparé. Il importe donc que l'on puisse garantir une marche stable même sans tenir compte de l'effet favorable de l'interconnexion. Toutefois, il est coûteux de s'astreindre à une section horizontale dépassant une limite qui peut être très élevée, ceci dans le seul but d'assurer la stabilité de réglage dans le cas, de moins en moins fréquent, de la marche sur réseau isolé. C'est pourquoi nous avons proposé [4] une méthode de stabilisation permettant de réduire la section de la chambre à la valeur minimum compatible avec l'oscillation en masse ; cette stabilisation est obtenue au détriment du maintien de la tension (ou de la fréquence), par asservissement temporaire de la puissance électrique à la charge hydraulique (ou, ce qui revient pratiquement au même, au niveau dans la chambre).

Les variations subséquentes de tension, ou de fréquence, sont faibles, et admissibles étant donné d'une part leur caractère temporaire et d'autre part le fait que la marche isolée est exceptionnelle. On pourrait également asservir la puissance électrique à l'ouverture de la turbine comme l'ont proposé MM. Gaden et Borel [5].

Toutefois ces travaux théoriques étaient basés sur l'hypothèse que le risque d'instabilité provenant de

¹ Les numéros entre crochets se réfèrent à la bibliographie indiquée en fin d'étude.

l'adduction (chambre d'équilibre) peut être traité indépendamment du risque d'instabilité provenant du réglage de vitesse (coup de bélier, turbine, alternateur et réseau). Ceci n'est vrai que si les périodes propres de la chambre d'équilibre et du réglage de vitesse sont suffisamment différentes; ce n'est pas toujours le cas et alors un contrôle de cette indépendance ne peut être fait qu'en effectuant le calcul complet, tenant compte simultanément de tous les éléments du réglage depuis la galerie d'amenée jusqu'au réseau de consommation. C'était le but d'une étude que nous avons faite en juillet 1952 [6] et qui montrait comment déterminer le degré de stabilité de réglage d'un aménagement, compte tenu de la chambre d'équilibre, du coup de bélier dans la conduite forcée, des caractéristiques dynamiques du régulateur de vitesse, du groupe turbo-alternateur et du réseau.

La complexité même du calcul rendait de plus en plus nécessaire un contrôle expérimental afin que l'on puisse vérifier la validité des nombreuses hypothèses simplificatrices admises. Ce contrôle a été organisé par le *Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique de Lausanne*. Avant d'exposer en détail quels sont les essais qui ont été exécutés et d'analyser les résultats obtenus, nous souhaitons exprimer ici notre gratitude à toutes les personnalités qui nous ont encouragés et aidés dans ces recherches. Notre reconnaissance va tout particulièrement à M. le professeur D. Bonnard dont la bienveillance et l'appui nous ont grandement facilité la tâche.

I. L'installation d'essai

L'usine de l'Oelberg (fig. 1) utilise une chute d'une vingtaine de mètres obtenue en coupant une boucle de 4 km que fait la Sarine à Fribourg. A côté d'une ancienne adduction alimentant trois groupes de 2500 CV chacun, les Entreprises électriques fribourgeoises ont construit en 1943 une adduction moderne, munie d'une chambre d'équilibre différentielle, et prévue pour faire fonctionner deux groupes de 7500 CV (fig. 2 et 3). Un seul de ces groupes est actuellement en service et c'est celui qui a été utilisé pour les essais (fig. 4).

La turbine, du type Kaplan, entraîne un générateur synchrone triphasé. Le réglage de vitesse est assuré par un régulateur accéléro-tachymétrique, tandis que la tension est contrôlée par un régulateur de tension avec statisme temporaire. Pour les essais, l'alternateur était chargé sur une résistance hydraulique.



FIG. 1
L'usine de l'Oelberg, à Fribourg.

Les caractéristiques principales de l'aménagement sont groupées dans le tableau I ci-après :

TABLEAU I

Caractéristiques principales du groupe hydroélectrique utilisé pour les essais de stabilisation

Puissance nominale	7 500 CV
Débit nominal	32 m ³ /sec
Chute maximum	20,8 m
Galerie d'amenée, longueur	270 m
» » section	18,3 m ²
Chambre d'équilibre, section totale	300 m ²
» » section réduite au puits	7 m ²
Conduite forcée, longueur	47 m
» » section	10,2 m ²
Turbine, type Kaplan, vitesse	250 t/min
Générateur, alternateur triphasé, tension	8 600 V
Moment de giration du groupe PD ²	170 tm ²

Pour la chambre d'équilibre, la section de Thoma (section limite pour laquelle les oscillations sont entretenues, dans l'hypothèse d'une puissance constante) est, avec les valeurs indiquées dans le tableau I, de 40 m². Il semblait donc que la stabilité du réglage était largement assurée par la section effective de 300 m². Pour

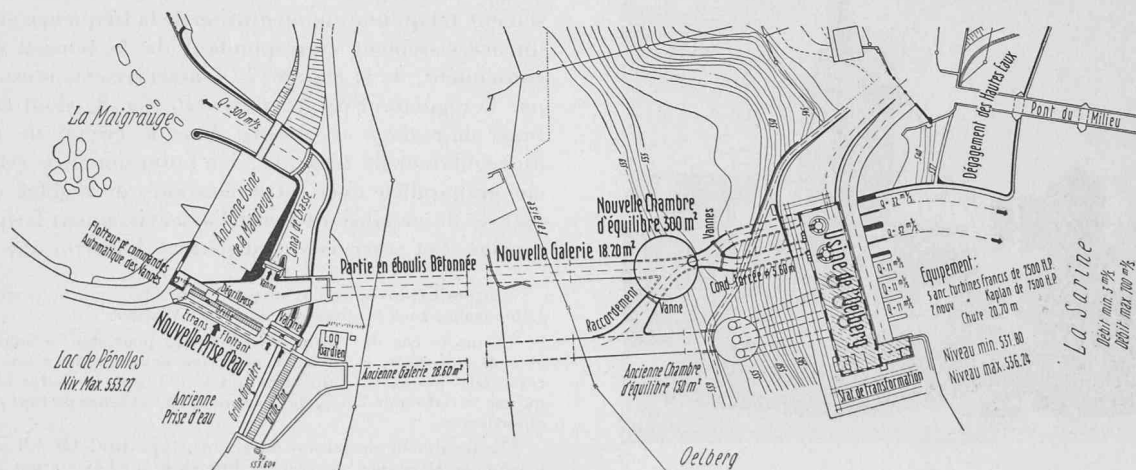


FIG. 2
Plan de situation.

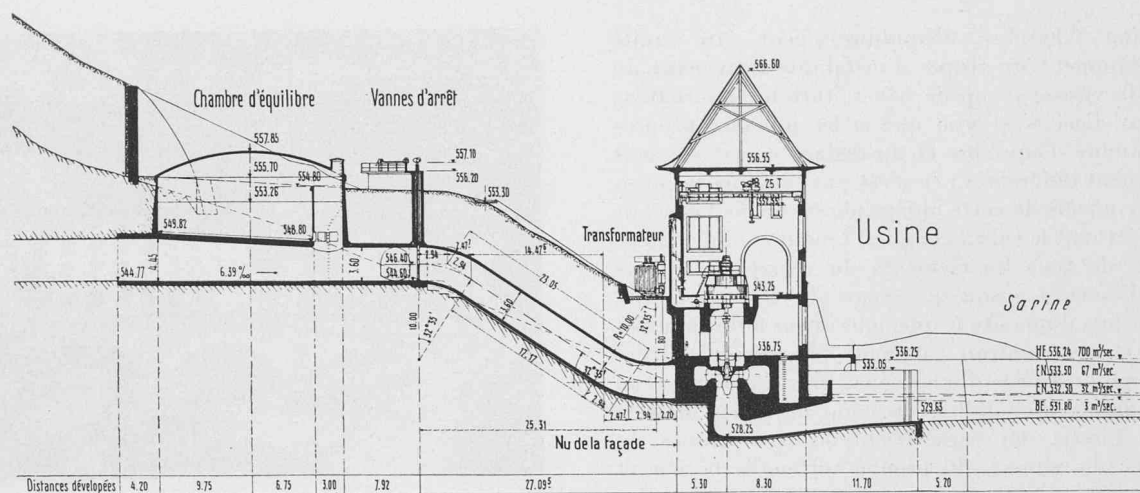


FIG. 3
Profil en long de la chambre d'équilibre et de l'usine.

pouvoir vérifier l'efficacité des dispositifs de stabilisation envisagés il était donc nécessaire de rendre au préalable l'installation instable. Dans ce but, on a prévu l'obturation des orifices de communication entre le puits et la chambre proprement dite; la section horizontale de la chambre d'équilibre se trouve ainsi réduite de 300 à 7 m², valeur très inférieure à la section de Thoma. Les cinq orifices carrés, de 1 m² chacun, sont fermés par des vannes légères, dites vantaux, pivotant sur leur axe vertical, formées par une tôle raidie; elles peuvent être manoeuvrées en tout temps du haut de la chambre (fig. 5 à 7), ce qui a permis de réduire au minimum la durée des essais proprement dits. Cet appareillage devait être monté pendant une interruption de marche de l'usine et après vidange de l'adduction.

La stabilisation du réglage de la marche de l'installation devait être obtenue par deux dispositifs utilisés isolément ou conjointement:

a) *Asservissement niveau d'eau - tension*. Ce premier dispositif, destiné essentiellement à empêcher une amplification des oscillations dans la chambre d'équilibre, était basé sur le principe de l'asservissement de la puissance électrique à la pression d'eau [4], obtenu en liant la tension de consigne de l'alternateur au niveau d'eau dans la chambre. Cet asservissement

niveau d'eau - tension a été réalisé suivant le schéma de la figure 8. Le générateur G est excité par l'excitatrice principale E dont la tension est réglée par le régulateur de tension R_t . La tension aux bornes de l'alternateur est mesurée par le transformateur de potentiel TP ; cette tension peut être ajustée à la main par l'intermédiaire du potentiomètre de réglage P_1 .

La position du plan d'eau dans la chambre d'équilibre est détectée par un flotteur, entraînant, par l'intermédiaire d'un jeu de poulies à gradins, le potentiomètre P_2 placé en série dans le circuit de mesure du régulateur de tension R_t (fig. 9). Avec plusieurs valeurs différentes de la résistance du potentiomètre P_2 ou en modifiant les rapports de transmission, on peut faire correspondre à tout écart donné du niveau d'eau une variation déterminée de la tension de consigne¹.

Pour ces essais, il n'a pas été nécessaire de limiter par des bornes l'action de l'asservissement comme nous l'avions proposé précédemment [4] pour éviter de trop grandes variations de la tension. En effet, la proximité du déversoir rendait impossible des montées importantes du niveau d'eau dans la chambre. Nous avons de même supprimé l'amortisseur destiné à rendre l'asservissement indépendants de variations lentes du niveau dans la chambre².

b) *Asservissement fréquence - tension*. Ce deuxième dispositif de stabilisation, destiné plus particulièrement à agir sur le réglage de vitesse, consiste en un asservissement tel qu'une augmentation de la fréquence entraîne un accroissement correspondant de la tension et, par conséquent, de la charge [7]. L'asservissement est réalisé par le régulateur de fréquence R_f (fig. 8), dont la résistance de réglage est insérée dans le circuit de mesure du régulateur de tension³. Un potentiomètre est branché en parallèle avec cette résistance de réglage et permet de doser ainsi à volonté l'asservissement fréquence-tension. Cet asservissement permet d'obtenir une valeur

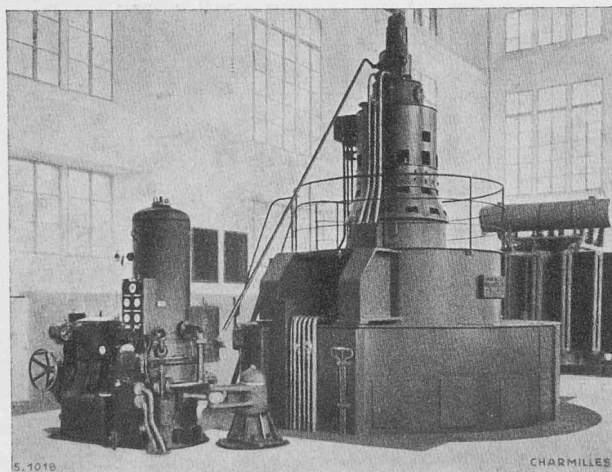


FIG. 4
Groupe de 7500 CV utilisé pour les essais.

¹ Dispositif mis au point et monté sur place par le personnel du Laboratoire, sous la direction de M. P. Wacker.

² Dans le cas de l'usine de l'Oelberg, pour des niveaux amont et aval constants, et pour un asservissement niveau d'eau - tension caractérisé par $kh = 1$, une variation de 100 % de la charge n'entraîne qu'une variation de 2,5 % de la tension, en l'absence de tout dispositif amortisseur.

³ Le régulateur de tension du groupe, type BBC AB 4/1 a normalement sa résistance de réglage branchée sur l'excitation shunt de l'excitatrice. Cependant pour les essais l'excitatrice était munie d'une excitation séparée.

élevée du coefficient de sensibilité des couples moteur et résistant aux écarts de fréquence (voir chap. II) même dans le cas défavorable d'une charge ohmique, comme c'était le cas pour les essais.

L'alternateur était raccordé à la résistance hydraulique par l'intermédiaire d'une ligne de 750 m à 30 kV et de deux transformateurs.

En outre, diverses dispositions accessoires avaient été prévues pour assurer le succès des essais; nous indiquerons en particulier:

a) Montage d'une commande permettant d'obtenir une variation sinusoïdale de la tension de consigne, de manière à pouvoir relever une courbe de comportement du dispositif de réglage de la tension.

b) Pour les essais principaux, mise en place d'appareils enregistreurs de la tension de consigne, de la tension aux bornes de l'alternateur, de la fréquence (fig. 10).

c) Installation d'une liaison téléphonique circulaire entre la salle de commande, la chambre d'équilibre et le régulateur de la turbine.

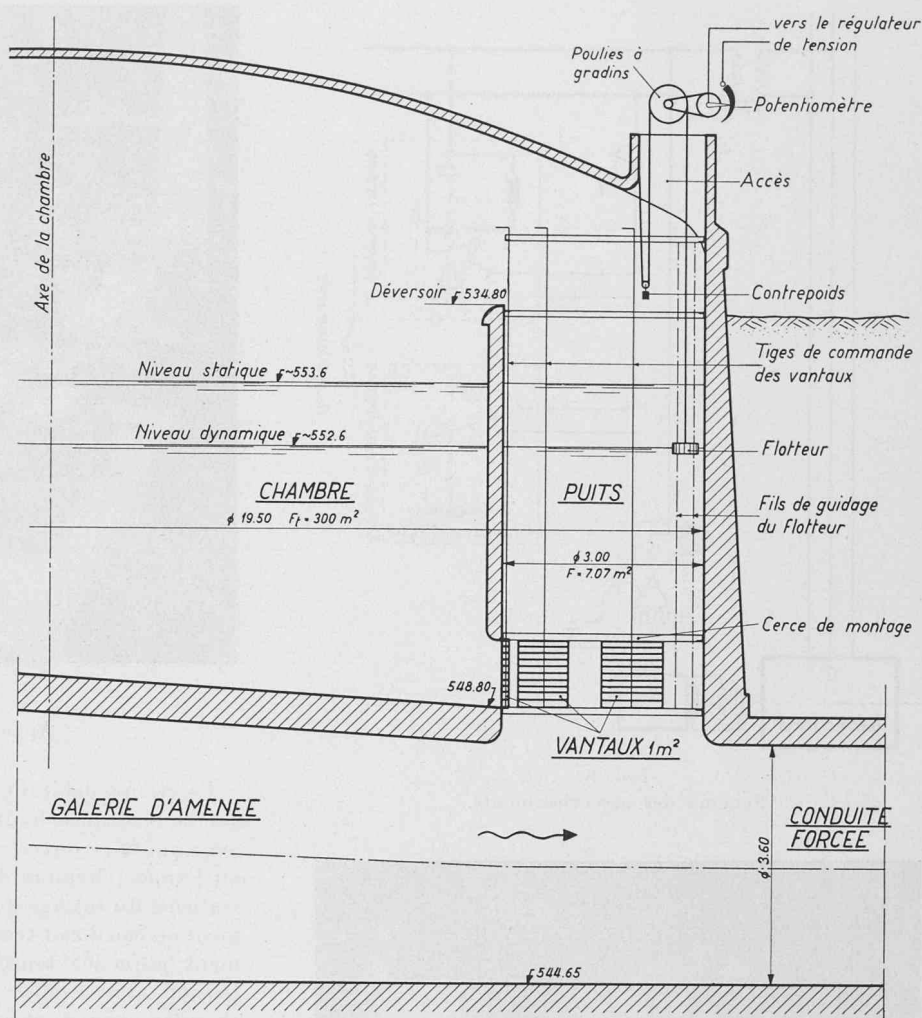


FIG. 5
Coupe de la chambre d'équilibre.

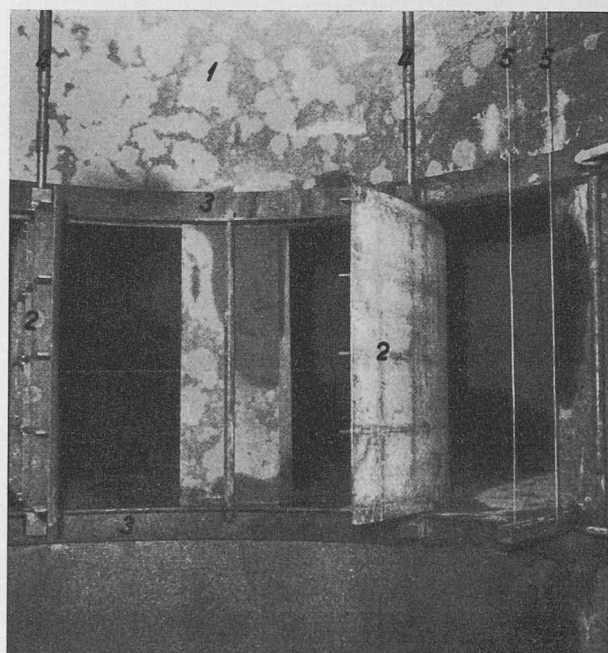
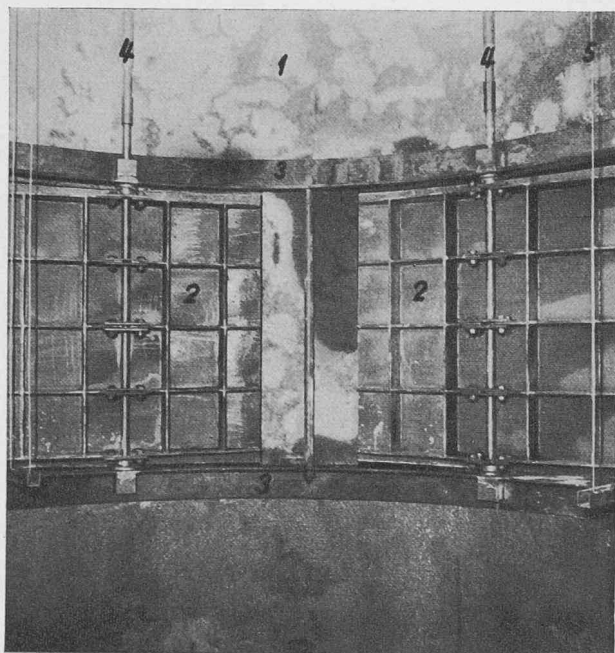


FIG. 6 et 7
Détails des vantaux

1. Béton du puits. — 2. Vantaux. — 3. Cerce de montage. — 4. Tiges de manoeuvre. — 5. Fils de guidage du flotteur.

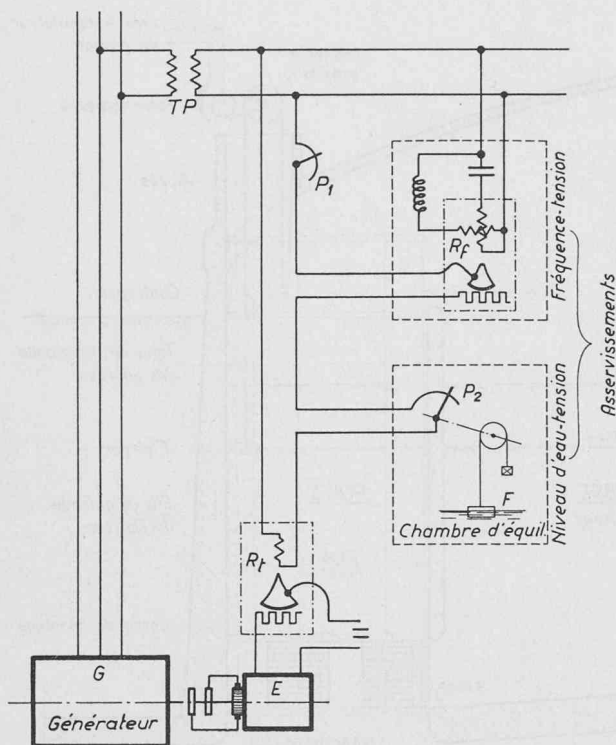


FIG. 8
Schéma des asservissements.

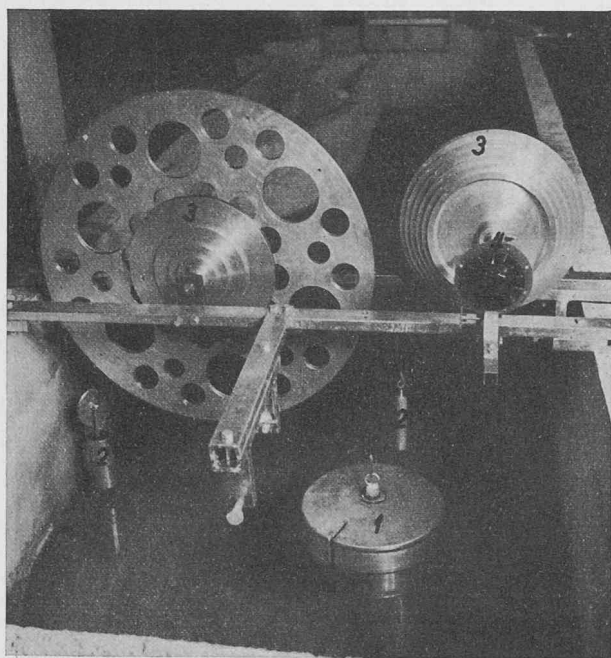


FIG. 9
Flotteur et poulies d'entraînement de l'asservissement niveau d'eau-tension (montage provisoire au Laboratoire)
1. Flotteur. 3. Poulies à gradins.
2. Contrepoids. 4. Potentiomètre.

II. Essais préliminaires (décembre 1951)

A. But des essais préliminaires et résultats expérimentaux

Les essais préliminaires ont eu pour but un premier examen de la méthode proposée pour la stabilisation des oscillations de réglage dans les chambres d'équilibre par l'asservissement de la puissance électrique à la pression d'eau [4].

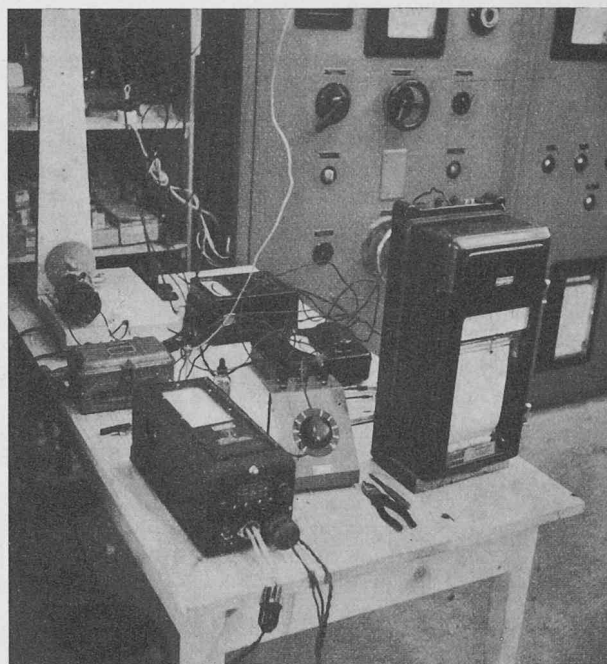


FIG. 10
Appareils enregistreurs.

Le groupe débitant une puissance d'environ 2500 kW sur la résistance hydraulique, on procéda à des essais avec vantaux ouverts (chambre d'équilibre de 300 m²) ou fermés (chambre d'équilibre de 7 m²), avec ou sans statisme du réglage de vitesse, avec ou sans asservissement niveau d'eau-tension. On n'a pas utilisé d'asservissement fréquence-tension ; l'asservissement niveau d'eau-tension était réalisé tel qu'il est décrit ci-dessus au chapitre I (fig. 8) et réalisait donc pratiquement l'hypothèse théorique d'un asservissement de la puissance électrique à la pression d'eau.

Les résultats constatés sont groupés dans le tableau II ci-après :

TABLEAU II
Résultats expérimentaux fournis par
les essais préliminaires
Puissance 2500 kW

Section de la chambre d'équilibre F m ²	Asservissement niveau d'eau-tension k_h	Statisme du réglage de vitesse %	Réglage observé	Période approximative sec
300	0	0	instable	18 — 20
300	0	1	limite	
300	0	3	stable	
7	0	3	très inst.	20
7	5	3	instable	20
7	8	3	instable	20

Les trois premiers essais montrent qu'en temps normal, c'est-à-dire avec vantaux ouverts et chambre d'équilibre de 300 m², en marche isolée sur charge ohmique, le réglage n'est stable qu'en maintenant un statisme du réglage de vitesse supérieur à environ 1% (l'instabilité observée avec statisme nul n'est pas imputable à une section insuffisante de la chambre

d'équilibre). La période propre du réglage de vitesse paraît être de 18 à 20 sec.

Avec la chambre d'équilibre de section réduite à 7 m² (vantaux fermés) on observe, comme prévu, une forte instabilité, malgré un statisme de 3 % du réglage de vitesse. Mais on constate que l'intervention de l'asservissement niveau d'eau-tension ne parvient pas à assurer la stabilité de la marche.

On a en outre relevé, et c'est le point le plus important observé au cours de ces essais préliminaires, que la période propre du réglage de vitesse est approximativement égale à celle de l'adduction (oscillations dans la chambre d'équilibre), soit environ 20 secondes.

Or, à la base de l'étude théorique [4] se trouvait l'hypothèse, généralement admise dans l'étude des chambres d'équilibre, que l'action du réglage de vitesse est suffisamment rapide vis-à-vis de la période de l'oscillation dans la chambre pour que l'on puisse admettre un réglage instantané et négliger cet effet dans le calcul. Cette hypothèse n'était donc pas valable dans le cas de l'usine de l'Oelberg et un complément d'étude théorique devenait nécessaire.

B. Etude théorique de la stabilisation compte tenu des caractéristiques dynamiques du réglage de vitesse

Il convient d'examiner la stabilité de réglage de l'ensemble formé par l'adduction (galerie d'amenée, chambre d'équilibre), la conduite forcée, la turbine et le régulateur de vitesse, l'alternateur et le réseau. Cette étude a déjà fait l'objet d'une communication du Laboratoire d'hydraulique [6] et nous ne ferons ici que rappeler les équations de départ et la condition de stabilité obtenue finalement. Le tableau III ci-après indique les désignations et définitions utilisées, ainsi que les valeurs numériques nominales de l'installation.

TABLEAU III

Désignations, définitions et valeurs numériques nominales¹

L	Longueur de la galerie d'amenée . . .	270 m
f	Section de la galerie d'amenée . . .	18,3 m ²
F	Section de la chambre d'équilibre	
	totale	300 m ²
	réduite	7 m ²
T_g	Temps caractéristique de la galerie d'amenée = $\sqrt{LF/gf}$ pour $F = 300$ m ²	21,3 sec
	pour $F = 7$ m ²	3,27 sec
g	Accélération de la pesanteur . . .	9,81 m/sec ²
Δx	Ecart relatif du plan d'eau de la chambre d'équilibre = $\Delta X/Z_*$ où ΔX = écart absolu . . .	variable
$\dot{\Delta x}$	Dérivée première par rapport au temps	variable
$\ddot{\Delta x}$	Dérivée seconde par rapport au temps	variable
Z_*	Grandeur de comparaison (montée maximum dans la chambre consécutive à une fermeture totale instantanée de la turbine, les pertes de charge étant nulles) = $Q_0 \sqrt{L/gf}$ pour $F = 300$ m ²	2,26 m
	pour $F = 7$ m ²	14,8 m
N_0	Puissance nominale de l'alternateur . . .	5 500 kw
λ	Facteur de charge : rapport de la puissance de régime à la puissance nominale . . .	paramètre
Q_0	Débit nominal . . .	32 m ³ /sec
p_0	Perte de charge relative = $\lambda(P_0 + E_0)/Z_*$	$f(\lambda)$
P_0	Perte de charge correspondant au débit nominal . . .	0,80 m

¹ Les écarts sont mesurés par rapport aux valeurs du régime permanent initial et leurs valeurs relatives sont calculées par rapport aux valeurs du régime nominal de l'installation.

E_0	Hauteur représentative de l'énergie cinétique à l'insertion de la chambre d'équilibre, pour le débit nominal . . .	0,16 m
Δq	Ecart relatif du débit de la conduite forcée par rapport au débit de régime = $(Q - \lambda Q_0)/Q_0$. . .	variable
Δy	Ecart relatif d'ouverture de la turbine par rapport à l'ouverture de régime, mesuré en écart de puissance à chute constante = $(Y - \lambda Y_0)/Y_0$. . .	variable
Δh	Ecart relatif de la charge hydraulique sur la turbine par rapport à la chute nette, dû à la variation du plan d'eau dans la chambre d'équilibre = $\lambda \cdot \frac{\Delta H}{H_0}$	variable
Δh_1	— idem — dû au coup de bélier . . .	variable
h_0	Chute nette relative = H_0/Z_* . . .	$f(\lambda)$
H_0	Chute nette . . .	19,8 m
T_c	Temps caractéristique de la conduite forcée = $\lambda L_c V_0 / 2gH_0$. . .	0,364. λ sec
L_c	Longueur de la conduite forcée . . .	47 m
V_0	Vitesse nominale d'écoulement dans la conduite forcée 32 m ³ /s : 10,2 m ² . . .	3,13 m/sec
T_r	Constante de temps du régulateur de vitesse (= promptitude de réglage $\mathcal{T}'$) admis pour calculs . . .	1,5 sec
ω	Pulsation . . .	variable
$\Delta \omega$	Ecart relatif de la pulsation et de la vitesse de rotation . . .	variable
m	Dosage accélérométrique, admis pour calculs . . .	1 sec
T_a	Constante d'accélération du groupe = $P D^2 \Omega_0^2 10^{-3} / 0,366 N_0$. . .	5,25 sec
PD^2	Moment de giration des masses tournantes . . .	170 t m ²
Ω_0	Vitesse de rotation nominale . . .	250 t/min
M_e	Couple résistant (électrique) . . .	variable
Δm_e	Ecart relatif du couple résistant par rapport au couple résistant de régime = $(M_e - \lambda M_0)/M_0$. . .	variable
M_t	Couple moteur (turbine) . . .	variable
Δm_t	Ecart relatif du couple moteur . . .	variable
$tg \alpha$	Pente aux environs du point de régime de la courbe du couple résistant en fonction de la vitesse = $\frac{dM_e/M_0}{d\omega/\omega_0}$. . .	voir chap. IV. B
$tg \beta$	Pente aux environs du point de régime de la courbe du couple moteur en fonction de la vitesse = $\frac{dM_t/M_0}{d\omega/\omega_0}$. . .	
a	Coefficient de sensibilité des couples aux écarts de fréquence = $tg \alpha - tg \beta$. . .	voir chap. IV. B
k_h	Coefficient d'asservissement niveau d'eau - tension = $\frac{\Delta n}{\Delta h} = \frac{\Delta N}{N_0} \cdot \frac{H_0}{\lambda \Delta H}$. . .	paramètre

La relation caractérisant l'inertie de la galerie d'amenée et la conservation des débits à l'insertion de la chambre d'équilibre lie la hauteur Δx du plan d'eau dans la chambre et le débit Δq de la conduite forcée, en valeurs relatives :

$$(1) \quad T_g^2 \ddot{\Delta x} + 2p_0 T_g \dot{\Delta x} + \Delta x = -T_g \dot{\Delta q} - 2p_0 \Delta q.$$

Dans cette équation et dans les suivantes on supposera toujours qu'il s'agit de petits mouvements et que le problème peut être linéarisé. Les variables dépendantes sont donc des écarts par rapport à la position de régime initial ; elles sont toutes exprimées en valeurs relatives. Le temps, variable indépendante, est conservé en valeur absolue. Enfin nous avons admis qu'une modification de la puissance de régime, donc de λ , n'entraînait

pas de changement de H_0 , ce qui est acceptable puisque P_0 ne représente qu'une faible fraction de H .

La relation liant le débit Δq à l'ouverture Δy de la turbine et aux variations de charge dues aux oscillations dans la chambre (Δh) et au coup de bélier (Δh_1) est :

$$(2) \quad \Delta q = \Delta y + \frac{1}{2}(\Delta h + \Delta h_1) \quad \text{avec} \quad \Delta h = \frac{\Delta x}{h_0}.$$

L'inertie de la conduite forcée (coup de bélier) nous donne :

$$(3) \quad \Delta h_1 = -2T_c \Delta \dot{q}.$$

Le régulateur de vitesse donne l'équation liant l'ouverture Δy de la turbine à la vitesse de rotation $\Delta \omega$:

$$(4) \quad -T_r \Delta \dot{y} = \Delta \omega + m \Delta \dot{\omega}.$$

La relation caractérisant l'inertie du groupe turbo-alternateur est :

$$(5) \quad T_a \Delta \dot{\omega} + \Delta m_e = \Delta m_t.$$

Le couple moteur Δm_t dépend de la charge hydraulique ($\Delta h + \Delta h_1$), de la vitesse de l'eau ($\Delta y + \frac{1}{2} \Delta h$) et de la vitesse de rotation $\Delta \omega$:

$$(6) \quad \Delta m_t = \Delta y + \frac{3}{2}(\Delta h + \Delta h_1) + \Delta \omega \operatorname{tg} \beta.$$

Le couple résistant Δm_e dépend des variations de la puissance Δn débitée sur le réseau, de la vitesse de rotation $\Delta \omega$ et, par le jeu de l'asservissement, du niveau d'eau dans la chambre :

$$(7) \quad \Delta m_e = \Delta n + k_h \Delta h + \Delta \omega \operatorname{tg} \alpha.$$

L'asservissement fréquence-tension se traduit par une modification artificielle de la pente $\operatorname{tg} \alpha$ intervenant dans l'équation (7).

L'étude de la stabilité de réglage de l'ensemble du dispositif défini par les sept équations ci-dessus peut être faite à l'aide de l'équation caractéristique du système. Avec s comme variable, on obtient :

$$(8) \quad 1 + \frac{1+sm}{sT_r} \cdot \frac{2}{a+sT_a} \left[\frac{1+sT_c+(1-k_h)\Phi_{qh}}{2(1+sT_c)-\Phi_{qh}} - \frac{3}{2} \cdot \frac{sT_c}{1+sT_c} \right] = 0$$

avec $\Phi_{qh} = \frac{1}{h_0} \cdot \frac{2p_0 + sT_g}{1 + 2sT_g p_0 + s^2 T_g^2}.$

Les conditions de stabilité sont données par la discussion des racines de cette équation caractéristique. Dans le cas général ces racines sont complexes ; il faut et il suffit que leurs parties réelles soient négatives. Cette condition peut être vérifiée le plus commodément en faisant usage des transformations conformes, ce qui conduit à appliquer le critère de Leonhard [9] dont le principe est rappelé brièvement ci-dessous.

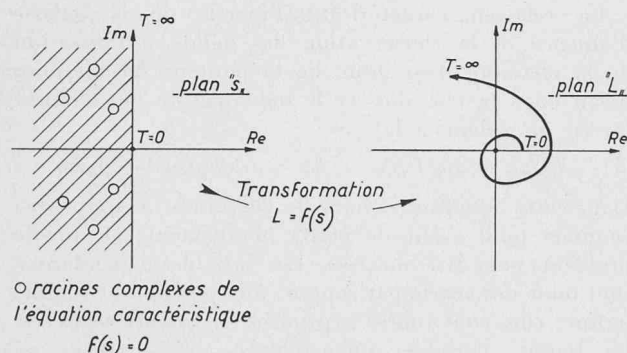


FIG. 11

Condition de stabilité selon critère de Leonhard.

Représentons tout d'abord le plan de la variable complexe s (fig. 11). Les racines doivent être situées dans le demi-plan hachuré, c'est-à-dire à gauche de l'axe imaginaire. En égalant à L le membre de gauche de l'équation caractéristique on définit une transformation conforme qui permet de passer du plan s au plan complexe L . Les différentes racines de l'équation caractéristique correspondent, par définition de la transformation, à l'origine dans le plan L . Il faut donc vérifier que la transformation du demi-plan hachuré définit dans le plan L un domaine comprenant l'origine.

Lorsque T varie, $s = j2\pi/T$ (où $j = \sqrt{-1}$) est l'équation de l'axe imaginaire du plan s ; sa transformée dans le plan L définit une courbe, dite « courbe de Leonhard ». Sous une forme abrégée, on peut dire que la condition de stabilité est réalisée si la courbe part d'un point positif de l'axe réel et entoure l'origine, en parcourant un nombre de quadrants égal au degré de l'équation caractéristique, comme c'est le cas pour la courbe de la figure 11.

Utilisant pour une application les valeurs correspondant au groupe turbo-alternateur de l'Oelberg, nous avions établi, pour le cas de la demi-charge ($\lambda = 0,5$), les courbes de Leonhard pour diverses valeurs de l'asservissement niveau d'eau-tension et pour deux cas $a = 0$ et $a = 2$ du coefficient de sensibilité des couples aux écarts de fréquence (asservissement fréquence-tension). On en pouvait tirer la conclusion que la stabilité de réglage ne pouvait être obtenue, dans ce cas particulier, par un asservissement niveau d'eau-tension qu'à la condition que celui-ci soit maintenu entre certaines limites ; l'optimum (maximum de l'effet de stabilisation) correspond à une valeur bien définie dans cet intervalle. Ces limites peuvent être élargies, et l'optimum accentué, par l'introduction d'un asservissement fréquence-tension augmentant le coefficient de sensibilité des couples aux écarts de fréquence. Deux diagrammes établis à cette occasion sont répétés aux figures 12 et 13 et illustrent les considérations qui précèdent.

Il est ainsi possible de comprendre pourquoi les essais préliminaires n'avaient pas permis d'obtenir une marche stable, malgré l'asservissement niveau d'eau-

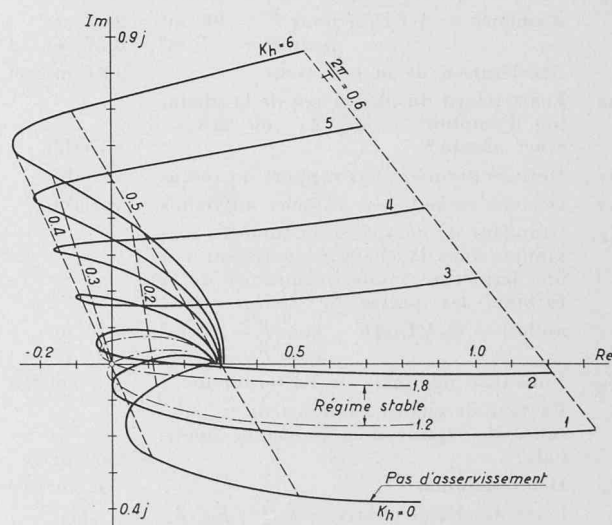


FIG. 12

Courbes de Leonhard pour demi-charge ($\lambda = 0,5$) et pour $a = 0$ (en admettant que le réglage de tension est instantané $T_u = 0$).

tension: les valeurs 5 et 8 admises pour cet asservissement étaient trop élevées et l'on était sorti de la zone favorable.

L'examen des essais préliminaires a également montré que la rapidité d'action du réglage de la tension n'était peut-être pas telle que l'on puisse continuer à admettre ce réglage comme instantané dans l'interprétation des essais.

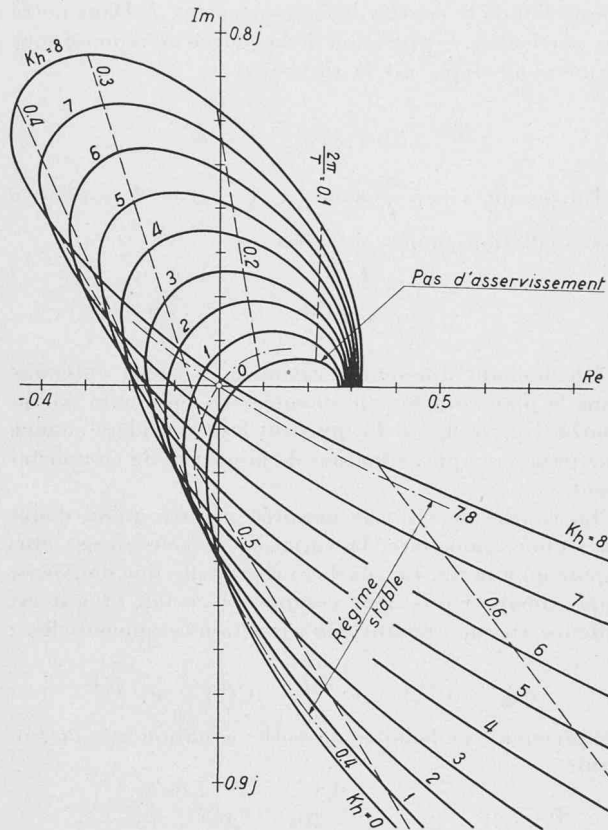


FIG. 13
Courbes de Leonhard pour demi-charge ($\lambda = 0,5$) et pour $a = 2$ (en admettant que le réglage de tension est instantané $T_u = 0$).

III. Détermination des caractéristiques dynamiques du réglage de tension

On a admis en première approximation, pour la détermination des conditions de stabilité de la marche d'une centrale avec chambre d'équilibre, que le réglage de tension était idéal, c'est-à-dire que la tension suivait instantanément les variations qui lui étaient imposées par les grandeurs auxquelles elle était asservie; en fait, lorsque la période des oscillations de la chambre d'équilibre est relativement courte, ainsi que c'est le cas pour la centrale d'Oelberg, il peut ne pas être légitime de négliger la durée du processus de réglage de la tension. Il a donc paru nécessaire de préciser par voie expérimentale et analytique la caractéristique dynamique de ce réglage.

La tension aux bornes de l'alternateur dépend d'une part de son courant d'excitation, d'autre part de sa vitesse.

Par suite de l'inertie du champ magnétique de l'alternateur, on peut admettre qu'à la suite d'une variation de la puissance débitée par le groupe ce champ magnétique reste tout d'abord constant. La tension de l'alternateur est alors directement proportionnelle à sa vitesse. Lorsque l'excitatrice est placée en bout d'arbre, comme c'est le cas en général, et en particulier pour la

centrale d'Oelberg, sa tension augmente également proportionnellement à la vitesse avant l'intervention du régulateur de tension. Il en résulte que, un peu plus tard, la tension aux bornes de l'alternateur augmente en fonction du carré de la vitesse, c'est-à-dire que l'écart de tension est proportionnel au double de l'écart de vitesse. Cet effet est encore accru si le groupe est muni d'une excitatrice auxiliaire également en bout d'arbre et on a observé des cas où la tension augmentait en fonction du cube de la vitesse [7].

Puis intervient le régulateur de tension qui règle la tension de l'excitatrice alimentant le champ d'excitation de l'alternateur.

Ainsi que cela est indiqué en principe sur la figure 8, l'asservissement de la tension au niveau d'eau ou à la fréquence était réalisé en modifiant la valeur d'un rhéostat d'asservissement branché en série avec le circuit de mesure du régulateur de tension. Nous avons déterminé par voie expérimentale et par voie théorique la relation dynamique qui existait entre la variation de la course du contact mobile du rhéostat d'asservissement et celle de la tension aux bornes de l'alternateur.

A. Détermination expérimentale

On sait qu'il existe principalement deux méthodes pour déterminer expérimentalement la caractéristique dynamique d'un dispositif de réglage [9]:

- le relevé de sa *courbe de comportement* à fréquence variable dite aussi *courbe de Nyquist*,
- le relevé de sa *courbe de réponse* dont il est ensuite possible de déduire la courbe de comportement.

Nous avons utilisé l'une et l'autre de ces méthodes.

a) Relevé de la courbe de comportement

Nous avons fait varier selon une courbe sinusoïdale la valeur du rhéostat d'asservissement qui modifie la valeur de consigne de la tension et avons enregistré simultanément cette variation et celle de la tension aux bornes de l'alternateur. Lorsque l'alternateur est en charge, les variations de tension se répercutent sur la tenue de la fréquence; ces variations de fréquence modifient à leur tour la tension. Pour éliminer l'influence de la fréquence sur la tension, il a paru préférable de relever la caractéristique dynamique du réglage de tension en marche à vide.

Le résultat de ces mesures est donné par le tableau IV. Afin de rendre les résultats des mesures comparables entre eux, nous avons posé égale à 1 l'amplitude relative de la variation de tension correspondant à une variation permanente de la fréquence.

TABLEAU IV

Relevé de la courbe de comportement du réglage de tension

Période	Déphasage	Amplitude relative
∞	0°	1
72 sec	25°	0,81
27 sec	45°	0,60
18 sec	63°	0,49
10 sec	75°	0,35

Le résultat de ces mesures est indiqué sur le diagramme vectoriel donné par la figure 14. Les points mesurés sont représentés par des cercles avec indication de la période des oscillations pour lesquelles les

mesures ont été faites. Nous voyons que le retard du réglage de la tension est loin d'être négligeable puisque le déphasage entre les deux oscillations est égal à 45° pour une période relativement très longue de 27 sec. Ce résultat s'explique en partie par le fait que les mesures ont été faites lorsque le générateur était à vide. Lorsqu'il est en charge, par suite du phénomène de saturation partielle du circuit magnétique de l'excitatrice et de l'alternateur, ce retard se trouve réduit de manière très appréciable.

Les quatre points mesurés de la courbe de comportement présentent une assez grande dispersion et ne sont pas suffisants pour caractériser l'ensemble de la courbe de comportement, aussi est-il apparu intéressant de la déterminer également à l'aide de la deuxième des méthodes que nous avons mentionnées ci-dessus.

b) Relevé de la courbe de réponse

Nous avons brèvement court-circuité, puis réenclenché, le rhéostat d'asservissement dans le circuit de mesure du régulateur de tension, et avons enregistré la variation de tension aux bornes de l'alternateur qui en est résultée. La courbe 1 de la figure 15 représente la courbe mesurée lors du court-circuitage (diminution de la tension), portée positivement; la courbe 2 de cette même figure représente la courbe mesurée lors de l'enclenchement de ce rhéostat (augmentation de la tension). Nous voyons que ces deux courbes ne se recouvrent pas, ce qui provient du fait que la variation de tension était relativement importante et que l'on a quitté le domaine de linéarité des phénomènes. La courbe 3 représente une courbe moyenne entre les courbes 1 et 2. Nous l'admettons comme étant la courbe de réponse du dispositif. Nous avons à nouveau posé égale à 1 la variation relative de tension en régime permanent.

La courbe 4 représente une première approximation de cette courbe de réponse donnée par une courbe exponentielle

$$\Phi_{vu} = \frac{u(t)}{\rho} = 1 - e^{-\frac{t}{T_u}}$$

avec ρ = variation relative de la valeur de consigne de la tension,

u = variation relative de la tension aux bornes de l'alternateur,

T_u = constante de temps du réglage de tension.

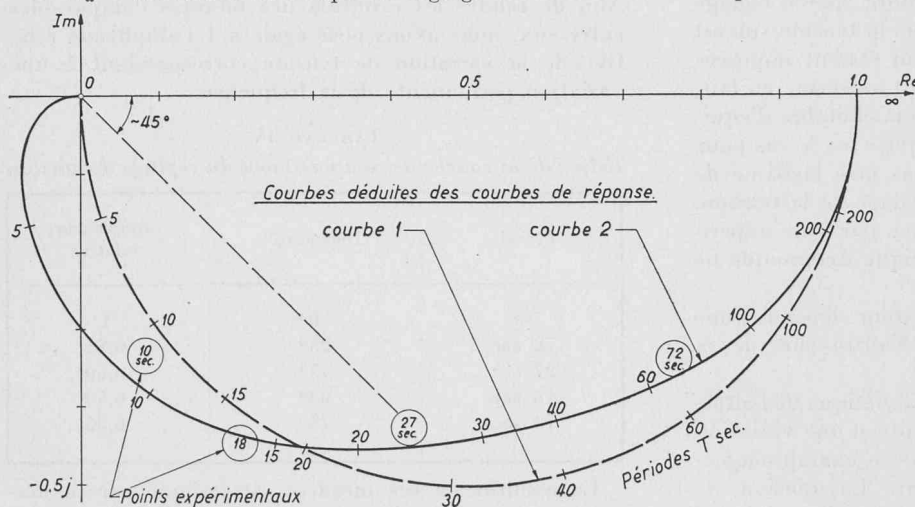


FIG. 14

Courbe de comportement du réglage de tension.

Il est connu [9] que pour obtenir la courbe de comportement correspondant à une courbe de réponse donnée, il suffit d'exprimer l'équation de cette courbe de réponse sous forme symbolique, ce qui donne la « fonction de transfert du dispositif », puis de remplacer l'opérateur s par $j\frac{2\pi}{T}$ pour obtenir dans le plan complexe

l'équation de la courbe de comportement J . Dans notre cas particulier, l'expression de la courbe de réponse sous forme symbolique est la suivante :

$$\Phi_{vu} = \frac{1}{1 + sT_u} \approx \frac{1}{1 + 4s}$$

En posant $s = j\frac{2\pi}{T}$ avec $j = \sqrt{-1}$ et T = période des oscillations, nous obtenons :

$$J_{vu} = \frac{1}{1 + T_u j \frac{2\pi}{T}} = \frac{1}{1 + 4j \frac{2\pi}{T}}$$

En donnant différentes valeurs à T , nous obtenons dans le plan complexe le demi-cercle représenté par la courbe 1 de la figure 14 qui peut être considéré comme une première approximation de la courbe de comportement.

La courbe de réponse mesurée montre qu'au début du régime transitoire, la variation de tension est plus rapide qu'à la fin. La courbe 5 représente une deuxième approximation qui tient compte de ce fait et qui est obtenue en superposant deux fonctions exponentielles :

$$\Phi_{vu} = 0,7 \left(1 - e^{-\frac{t}{2}}\right) + 0,3 \left(1 - e^{-\frac{t}{10}}\right)$$

l'expression symbolique de cette équation est la suivante :

$$\Phi_{vu} = \frac{0,7}{1 + 2s} + \frac{0,3}{1 + 10s} = \frac{7,6s + 1}{20s^2 + 12s + 1}$$

La courbe enregistrée montre en outre que la courbe de réponse commence par une tangente horizontale, ce qui conduit à une troisième approximation obtenue par la superposition de trois fonctions exponentielles (courbe 6) :

$$\Phi_{vu} = 0,85 \left(1 - e^{-\frac{t}{2}}\right) + 0,45 \left(1 - e^{-\frac{t}{10}}\right) - 0,3 \left(1 - e^{-\frac{t}{0,645}}\right)$$

La courbe 2 de la figure 14 représente la courbe de comportement correspondante qui coïncide de façon satisfaisante avec les quelques points relevés directement.

B. Détermination analytique

Pour déterminer par voie analytique le comportement dynamique du réglage de tension, il est tout d'abord nécessaire de connaître le comportement de chacun des éléments qui constituent le circuit de réglage. En première approximation, nous admettons que le dispositif de réglage de la tension est constitué par deux éléments :

- le régulateur, avec comme grandeur d'entrée la tension u aux bornes de l'alternateur et comme

grandeur de sortie la course r du régulateur,

- le groupe y compris son dispositif d'excitation, avec la course du régulateur comme grandeur d'entrée et la tension aux bornes comme grandeur de sortie.

Les caractéristiques de ces deux éléments sont connues [10]. Nous les rappelons en grandes lignes comme suit :

a) Caractéristique dynamique du régulateur de tension

Le régulateur de tension type BBC AB 4/1 est statique avec statisme passager. Nous admettrons que l'on peut négliger la constante de temps due au frottement et à l'inertie du système mobile du régulateur et ne retenons que celle due à son dispositif d'amortissement. Nous obtenons la courbe de réponse suivante :

$$\Phi_{ur} = \frac{\Delta r(t)}{\Delta u} = \frac{1}{\delta_r} \left[\frac{\delta_r}{\delta_p} + \left(1 - \frac{\delta_r}{\delta_p}\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_t}}\right) \right]$$

avec Δr = variation relative de la course du régulateur,
 Δu = variation relative de la tension,

δ_r = statisme permanent du régulateur de tension,

δ_p = statisme passager du régulateur de tension,
 T_t = constante de temps du régulateur.

Sous forme symbolique, nous obtenons la fonction de transfert suivante :

$$\Phi_{ur} = \frac{1}{\delta_r} \left(k_r + \frac{1 - k_r}{1 + sT_t} \right) = \frac{1}{\delta_r} \cdot \frac{1 + sk_r T_t}{1 + sT_t}$$

avec $k_r = \frac{\delta_r}{\delta_p}$ rapport du statisme permanent au statisme passager.

b) Caractéristique dynamique du groupe

En première approximation, nous pouvons admettre que la courbe de réponse du groupe est une courbe exponentielle et nous obtenons :

$$\Phi_{ru} = k_g \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right)$$

avec k_g = rapport, en régime permanent, de la variation relative de la tension à la variation relative de la course du régulateur. Ce coefficient est une mesure de la capacité de réglage du régulateur

T_p = constante de temps du groupe.

Il en résulte la fonction de transfert suivante :

$$\Phi_{ru} = \frac{k_g}{1 + sT_p}$$

c) Fonction de transfert du dispositif de réglage de tension

Lorsque les caractéristiques de chacun des éléments du circuit de réglage sont connues, il est possible de déterminer le comportement du réglage, et en particulier la variation de la tension résultant d'une variation

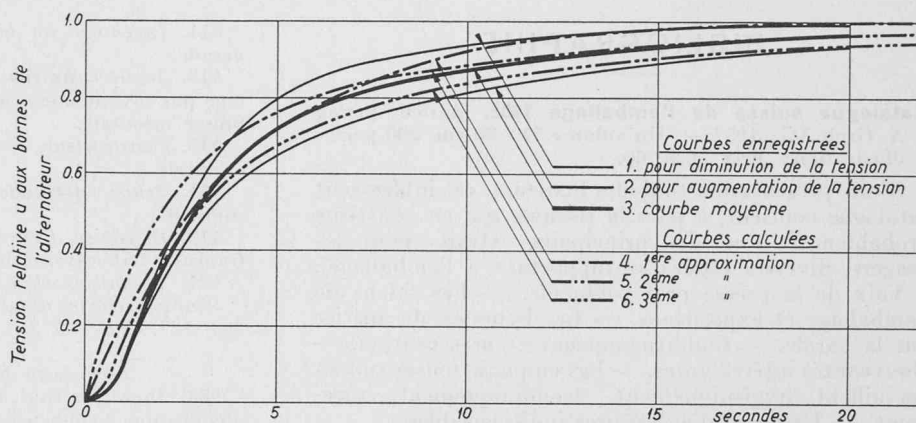


FIG. 15

Courbes de réponse du réglage de tension.

de sa valeur de consigne v . Nous obtenons sous forme symbolique :

$$\begin{aligned} \Phi_{vu} &= \frac{\Phi_{ru}\Phi_{ur}}{1 + \Phi_{ru}\Phi_{ur}} \\ &= \frac{k_e \frac{1 + sk_r T_t}{(1 + sT_t)(1 + sT_p)}}{1 + k_u \frac{1 + sk_r T_t}{(1 + sT_t)(1 + sT_p)}} \\ &= \frac{k_e}{1 + k_e} \cdot \frac{1 + sk_r T_t}{\frac{s^2 T_t T_p}{1 + k_e} + s \frac{T_t + T_p + sk_r k_u T_t}{1 + k_e} + 1} \end{aligned}$$

avec $k_e = \frac{k_g}{\delta_r}$.

Cette fonction de transfert a la même forme que celle obtenue pour la deuxième approximation de la courbe de réponse. Nous retrouvons approximativement les mêmes coefficients en introduisant les valeurs numériques suivantes, ainsi qu'il est facile de le vérifier :

$\delta_r = 5\%$; $\delta_p = 10\%$; $k_g = 10\%$; $T_p = 4s$; $T_t = 15s$.

Ces coefficients correspondent, en première estimation, aux données de l'installation d'essai. La valeur relativement forte de T_t , et celle relativement faible de k_g proviennent du fait que le régulateur de tension était utilisé avec excitation séparée pour laquelle il n'était pas conçu ; la rapidité de la réponse du réglage de tension peut être augmentée par une diminution de l'amortissement du régulateur et du statisme passager et par une augmentation de sa capacité de réglage.

Pour tenir compte dans la détermination des conditions de stabilité du retard qui affecte le réglage de tension, il faut multiplier le facteur d'asservissement k_h par la fonction de transfert Φ_{vu} .

En ce qui concerne l'asservissement fréquence-tension, nous avons vu qu'un asservissement « naturel » était réalisé spontanément avant l'intervention du régulateur de tension par suite de l'inertie du champ magnétique de l'alternateur ; l'asservissement à la fréquence au moyen du régulateur de fréquence ne fait que renforcer cet asservissement naturel en empêchant l'intervention du régulateur de tension de se faire ; aussi avons-nous estimé légitime d'admettre que, contrairement à l'asservissement niveau d'eau-tension, l'asservissement fréquence-tension est instantané.

(à suivre.)