Essais de la cheminée d'équilibre de Cordéac en ce qui concerne la condition de Thoma

Tests on the Cordéac surge tank, concerning Thoma's condition

PAR

J. CHEVALIER

ET

M. HUG

DÉPARTEMENT DES ESSAIS EXTÉRIEURS DE L'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

Les essais effectués sur l'installation de Cordéac ont permis de comparer la stabilité effective de marche d'une usine ayant une cheminée d'équilibre de section voisine de la section de Thoma à la marge de stabilité que l'on peut déduire des hypothèses sur lesquelles est basé le calcul de la condition de Thoma. En outre, ces essais ont mis en évidence l'influence importante de tout retard introduit dans la chaîne de régulation de l'usine. La prise en compte de ces retards a permis d'une part de vérifier la validité des hypothèses de calcul et d'autre part de donner une explication possible du caractère des résultats des essais effectués également sur installations industrielles par le Professeur Scimemi.

The tests carried out on the Cordéac installation have allowed a comparison to be made between the actual operational stability of a power house having a surge tank with a cross sectional area approximately equal to the Thoma area and the stability range as deduced from the hypotheses on which the calculation of the Thoma condition is based. The tests have also shown the important influence of any delay imparted to the governing sequence of the power house. Taking these delays into account has allowed the validity of the calculation hypotheses to be verified and, further, to give a possible explanation of the character of the results obtained from tests carried out on industrial installations by Professor Scimemi.

INTRODUCTION

Depuis les premières oscillations du plan d'eau de la cheminée d'équilibre de Heimbach et la formulation par le professeur Thoma de la cause de ces oscillations avec l'introduction de la notion de section critique, le problème de la stabilité du plan d'eau de la cheminée d'équilibre d'un système alimentant une usine fonctionnant à puissance constante a été l'objet de nombreux travaux.

Bien que le choix d'une section de cheminée au moins égale à la « section de Thoma » soit généralement considéré comme une règle de bonne construction, il semble qu'il reste un doute sur le caractère plus ou moins impératif de cette condition.

Les essais de stabilité des cheminées d'équilibre, réalisés par le professeur A. Scimemi sur des équipements hydrauliques italiens, et qui ont fait l'objet d'une communication au Congrès de Padoue en octobre 1947, ont remis en lumière le caractère un peu théorique de la condition de Thoma, par le fait que des cheminées d'équilibre, de section notablement inférieure à la section de Thoma, n'ont pas présenté d'instabilité lorsque l'installation correspondante, mise en réseau séparé, a fonctionné à puissance constante.

Il a donc paru opportun de réaliser en France des essais grandeur nature dans le but de vérifier les hypothèses de calcul généralement admi-

ses pour étudier la stabilité de marche d'une installation fonctionnant à puissance constante. Le choix s'est porté sur l'usine de Cordéac, dont la cheminée est de section voisine de la section théorique de Thoma. De façon à vérifier systématiquement les équations admises pour le calcul de la section de Thoma, les essais n'ont pas

été limités à des essais de marche à puissance constante; une méthode d'asservissement direct du vannage à la cote du plan d'eau dans la cheminée a permis, en effet, de réaliser une large gamme de modes de fonctionnement de part et d'autre de la marche à puissance constante.

DESCRIPTION DE L'USINE DE CORDÉAC

L'usine de Cordéac utilise sur le Drac une chute brute de 95 m environ et un débit maximum de 81 m³/s. Les eaux sont prises à la sortie de l'usine du Sautet dans un petit réservoir de 37.000 m³ de capacité utile créé par un contre-barrage déversant. L'usine de Cordéac, en série avec l'usine du Sautet, absorbe donc, en exploitation normale, le même débit que cette dernière.

Les ouvrages d'amenée comprennent :

- Un canal souterrain en charge, de 5,80 m de diamètre et de 4.600 m de longueur, comportant à son extrémité aval une cheminée d'équilibre cylindrique de 15 m de diamètre munie d'un étranglement inférieur dissymétrique;
- Deux conduites forcées de béton armé, de 153 m de longueur.

La mesure de la perte de charge dans la galerie pour le débit maximum donne 4,8 m. On en déduit que la section de Thoma est de 136 m²

alors que la section réelle de la cheminée est 176 m².

L'usine est équipée de deux groupes turbine-alternateur dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

1° TURBINES :	GROUPE N° 2	GROUPE N° 1
Type : Francis à axe vertical..		
Puissance (sous une charge de 92 m) en ch	56 000	28 000
Débit total absorbé en m ³ /s..	58	29
Vitesse en tr/mn.....	214	300
2° ALTERNATEURS :		
Puissance apparente en kVA..	42 000	21 000
Tension normale en kV.....	10,5	10,5
Excitatrice en bout d'arbre.		

DESCRIPTION DES ESSAIS RÉALISÉS

D'une façon générale, les premières constatations sur la condition de Thoma, ainsi que, par exemple, les essais réalisés par le professeur Scimemi, ont été effectués sur des installations fonctionnant en réseau séparé, le régulateur du groupe étant chargé de maintenir la puissance constante. Les essais réalisés à l'usine de Cordéac ont été basés sur un principe légèrement différent, où le groupe étudié débite sur le réseau général interconnecté et où la puissance est réglée directement en asservissant la position du vannage, c'est-à-dire le débit à la cote du plan d'eau dans la cheminée d'équilibre. Cette méthode présente plusieurs avantages; en effet, il n'est pas toujours facile d'isoler sur un réseau donné une certaine charge et de faire varier cette charge, alors que, dans le cas étudié, la puissance et la variation de puissance sont accessi-

bles au moyen de l'asservissement direct du débit à la chute; d'autre part, pour une installation fonctionnant en réseau séparé, le régulateur ne maintient qu'imparfaitement la puissance à sa valeur de régime, ou plus exactement introduit un certain retard à la commande du vannage.

Les mesures ont consisté à déterminer les amortissements des oscillations dans la cheminée pour les différents régimes de marche envisagés. Il convient d'introduire ici une remarque sur la notion de stabilité du plan d'eau dans une cheminée d'équilibre. Les petits écarts qui ne sont pas détectés par le régulateur du groupe ou, dans notre cas, par les appareils de mesures, sont sans effet sur la marche de l'installation car, en ce qui les concerne, la turbine fonctionne à vannage bloqué; c'est seulement à partir d'un

FIG. 1

IMPLANTATION DE L'USINE DE CORDEAC

certain seuil qu'un écart de régime ou du plan d'eau peut entraîner des oscillations amorties, entretenues ou amplifiées. Les mesures qui ont été effectuées consistaient donc à produire un à-coup initial de régime, puis à enregistrer les variations consécutives du plan d'eau dans la cheminée et à déterminer l'amortissement des oscillations produites.

La première série de mesures a permis de contrôler la validité des équations généralement admises pour le calcul des cheminées d'équilibre. Elle a fixé également la marge de stabilité dont dispose l'installation étudiée.

Dans la suite des essais, on a comparé deux moyens d'augmenter cette marge de stabilité, à savoir :

a) *Asservissement du vannage au niveau de la cheminée et à la vitesse de variation de ce niveau.*

Cet asservissement a pu être réalisé à l'aide de l'appareil de télé réglage chargé de maintenir l'égalité des débits entre les usines du Sautet et de Cordéac.

b) *Asservissement de la tension au niveau de la cheminée d'équilibre.*

Cette méthode avait déjà fait l'objet d'études théoriques (1), mais n'avait pas encore, à notre connaissance, reçu d'application pratique.

(1) Voir *Bulletin technique de la Suisse Romande* du 12 août 1950.

FIG. 2. — SCHÉMA D'ENSEMBLE DE L'USINE DE CORDEAC

ÉTUDE DE LA CONDITION DE THOMA

La méthode la plus naturelle consiste à se placer, comme le fait Thoma, dans des conditions de fonctionnement à puissance constante, c'est-à-dire de compenser, par une action sur le vannage, les variations de la hauteur de chute nette H_n de la turbine de façon à obtenir la loi :

$$QH_n = C^{te}$$

qui peut aussi s'exprimer par :

$$\frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta H_n}{H_n} = 0$$

Les calculs développés plus loin montrent que cette relation conduit, pour les petites oscillations, à une condition de la forme :

$$\Delta Z + A \Delta X = 0$$

où ΔX et ΔZ représentent les écarts par rapport au régime permanent du vannage et du niveau dans la cheminée d'équilibre.

Pour étudier d'une façon systématique les équations admises pour le calcul des oscillations dans les cheminées d'équilibre, nous avons fait varier au cours des essais le coefficient d'asservissement A , ce qui correspond à utiliser une loi plus générale de la forme :

$$\frac{\Delta Q}{Q} + \alpha \frac{\Delta H_n}{H_n} = 0$$

ou encore :

$$QH_n^\alpha = C^{te}$$

Cette condition a été réalisée pratiquement en faisant coïncider sur une règlette deux spots lumineux représentant l'un le vannage et l'autre le niveau de la cheminée. Le réglage du coefficient d'asservissement α était obtenu en agissant sur la sensibilité du galvanomètre traduisant les variations du niveau de la cheminée. Étant donné la grande période des oscillations naturelles, qui est de l'ordre de 6 minutes, cet asservissement a pu être effectué manuellement, par action sur le limiteur d'ouverture du groupe.

a) *Calcul de l'amortissement des oscillations du niveau de la cheminée dans le cas du fonctionnement à un seul groupe.*

Nous reprendrons le calcul établi par MM. Calame et Gaden en l'adaptant aux conditions de notre essai (1).

Le régulateur agit sur le vannage en fonction

du niveau de la cheminée d'équilibre de manière à vérifier la relation :

$$\Delta Z + A \Delta X = 0 \quad (1)$$

où les écarts ΔZ et ΔX sont mesurés à partir du régime permanent suivant les notations de l'ouvrage cité plus haut.

$H + Z$ représente la hauteur de chute brute.

$$H_n = H + Z + \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) - \lambda Q^2 \text{ la chute nette}$$

Si on suppose le niveau aval constant au cours d'une oscillation, l'écart de chute nette a pour expression :

$$\Delta H_n = \Delta Z + \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) - 2\lambda Q \Delta Q = \Delta Z - 2\lambda' Q \Delta Q$$

L'écart de débit est dû à la fois aux variations du vannage et à celles de la hauteur de chute. Il est donc de la forme :

$$\Delta Q = \frac{\Delta X}{k} + \frac{Q}{2} \frac{\Delta H_n}{H_n}$$

où k désigne l'inverse de la pente de la courbe débit-ouverture.

En éliminant les écarts ΔX et ΔZ on obtient, entre les variations du débit et de la hauteur de chute nette, la relation :

$$\frac{\Delta Q}{Q} + \alpha \frac{\Delta H_n}{H_n} = 0$$

ou :

$$QH_n^\alpha = C^{te}$$

avec :

$$\alpha = \frac{(H_n/QAk) - (1/2)}{1 + (2\lambda'Q/Ak)} = \frac{(H_n/Q) - (Ak/2)}{Ak + 2\lambda'Q} \quad (2)$$

Le calcul se conduit d'une manière analogue à celle de Thoma.

En appelant P' la perte de charge dans la conduite, la relation précédente (2) peut s'écrire :

$$Q(H + Z - P')^\alpha = Q_0(H_0 - P'_0)^\alpha$$

Soit en introduisant la vitesse de l'eau v dans la conduite :

$$\frac{v}{v_0} \left(\frac{H_0 - P'_0}{H + Z - P'} \right)^\alpha = \left(\frac{H_0 - P'_0}{H_0 + P_0 - Z - P'} \right)^\alpha$$

ce qui donne en valeurs réduites, en divisant par Z^* :

(1) Cette adaptation est due à M. Laurent.

$$u = \left(\frac{h_0 - p'_0}{h_0 - p' + p_0 + z} \right)^a$$

D'où l'on tire l'amortissement par unité de temps réduit :

Définition des cotes

FIG. 3. — SCHÉMA DE DÉFINITION DES COTES

comme la variation de p' est faible devant $p_0 + z$, on peut écrire :

$$u = \left(\frac{1}{1 + (p_0 + z)/(h_0 - p'_0)} \right)^a$$

en posant :

$$\begin{aligned} p_0 + z &= x \\ h_0 - p'_0 &= h'_0 \end{aligned}$$

La relation devient :

$$u = 1 - \frac{zx}{h'_0} \quad (3)$$

Le problème s'exprime alors en coordonnées réduites par le système d'équations (donné dans l'ouvrage précédemment cité) :

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \frac{dW}{dt'} + z + p &= 0 \\ w &= v + u \\ v &= \frac{1}{2\pi} \frac{dx}{dt'} \\ p &= \pm p_0 w^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

En remplaçant u par sa valeur (3), nous obtenons :

$$p = p_0 \left[1 + \frac{1}{\pi} \frac{dx}{dt'} - \frac{2zx}{h'_0} \right]$$

et :

$$w = \frac{1}{2\pi} \frac{dx}{dt'} + 1 - \frac{zx}{h'_0}$$

d'où l'équation du mouvement :

$$\left(\frac{1}{2\pi} \right)^2 \frac{d^2x}{dt'^2} + \frac{1}{2\pi} \frac{dx}{dt'} \left[2p_0 - \frac{zx}{h'_0} \right] + x \left[1 - \frac{2xp_0}{h'_0} \right] = 0 \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} \frac{1/2\pi [2p_0 - (zx/h'_0)]}{(1/2\pi)^2}$$

$$a = \pi \left[2p_0 - \frac{zx}{h'_0} \right] \quad (6)$$

b) Variables réduites :

Le calcul établi par MM. Calame et Gaden se fait en rapportant les paramètres de l'installation étudiée à une hauteur Z^* et un temps T^* :

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{LF}{gf}}$$

$$Z^* = W_0 \sqrt{\frac{Lf}{gF}}$$

Le temps T^* est en fait la durée théorique d'une oscillation du système retenue-galerie-cheminée et la hauteur Z^* est l'amplitude d'une oscillation correspondant à un déclenchement de l'usine, calculée en négligeant les pertes de charge.

Dans la plupart des installations connues, T^* est très voisin de la période mesurée; dans le cas de Cordéac, T^* diffère notablement de la période observée; en effet :

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{4.600 \times 176}{9,81 \times 26,5}} = 350 \text{ s}$$

alors que la période observée est de 400 secondes. Cette différence provient du fait que la section $F=176 \text{ m}^2$ prise en compte est celle de la cheminée d'équilibre, mais qu'en réalité un certain nombre de surfaces libres dans des ouvrages secondaires viennent s'ajouter à la section principale et ceci d'une façon difficile à chiffrer. Les ouvrages secondaires en question sont les puits de vannes de tête des conduites forcées, de limniographe et aussi un conduit d'aération de la galerie.

Il a donc paru préférable de se baser, pour

le calcul des variables réduites, sur la valeur mesurée de la période, d'autant plus que la mesure de cette période a pu être effectuée de façon assez précise pour de petites oscillations, sans amortissement appréciable, en enregistrant la cote du plan d'eau dans la cheminée pendant l'arrêt des usines de Cordéac et du Sautet (graphique 5).

Les oscillations résiduelles du plan d'eau dans la cheminée se maintenant pendant plus de quatre heures, il est facile de les compter sur une assez longue période.

Cette manière d'opérer permet de prendre également en compte l'influence des oscillations du plan d'eau derrière le contre-barrage. Finalement, pour éviter des corrections ultérieures, nous avons utilisé comme variables réduites les paramètres de l'installation rapportés à la période réelle de 400 secondes et à une hauteur Z^* qui s'en déduit par la formule :

$$Z^* = \frac{Q_0 L}{g f} \frac{2\pi}{T^*}$$

obtenue en éliminant F entre les expressions de Z^* et de T^* .

c) Correction de retard à la commande du vannage :

La commande du vannage devait initialement s'effectuer d'après les indications d'un manomètre branché sur la galerie. Des difficultés d'ordre expérimental conduisirent à commander le vannage d'après les indications d'un limnigraphe donnant le niveau dans un puits situé à côté de la cheminée d'équilibre.

Un enregistrement simultané des indications du manomètre et du limnigraphe indique un retard de phase du puits, de l'ordre de 20 secondes (graphique 6). Ce retard fut donc introduit dans la commande du vannage et on peut remarquer qu'il est du même ordre de grandeur que celui qu'introduirait un régulateur par suite de sa constante de temps.

En ce qui concerne la constante de temps du régulateur, on considère généralement que sa valeur est parfaitement négligeable devant la période des oscillations dans la cheminée; il semble qu'en réalité l'effet de ce « retard à la commande » s'intègre sur toute la durée d'une oscillation.

Pour faire une estimation de l'erreur due à ce retard, on peut le considérer comme introduisant un « débit de fuite » par rapport à l'équation de continuité du système (4) :

$$W = V + v$$

Si la variation de pression dans la conduite se fait selon la loi :

$$Z = Me^{-at} \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

et que la commande du vannage se fasse d'après la pression retardée d'une quantité φ :

$$z = Me^{-at} \sin 2\pi \frac{t + \varphi}{T}$$

le « débit de fuite » correspondant aura pour valeur :

$$\delta Q = \frac{1}{2} \frac{Q_0}{H_0} 2\pi \frac{\varphi}{T} Me^{-at} \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

Notons que ce débit de fuite est positif pour :

$$-\frac{1}{4} < \frac{t}{T} < \frac{1}{4}$$

c'est-à-dire quand le plan d'eau monte, et qu'il est négatif pour :

$$\frac{1}{4} < \frac{t}{T} < \frac{3}{4}$$

c'est-à-dire quand le plan d'eau descend.

En d'autres termes, le retard à la commande va diminuer à la fois la montée du plan d'eau et sa descente. Par rapport à une commande parfaite, la variation de volume emmagasiné dans la cheminée au bout d'une période sera :

$$\delta V \sim 2\varphi \frac{Q_0}{H_0} \frac{Z_1 + Z_2}{2}$$

le rapport de deux oscillations consécutives sera modifié de :

$$\delta \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{2\varphi Q_0}{FH_0} \frac{1 + (Z_2/Z_1)}{2}$$

ou encore l'exposant a sera modifié de :

$$\delta a = \frac{2\varphi Q_0}{FH_0} \frac{(Z_1/Z_2) + 1}{2}$$

d) Résultats des essais et comparaison avec les amortissements théoriques :

Les résultats bruts des essais se présentent sous la forme de diagrammes (dont l'un est figuré sur le graphique n° 1) qui représentent, pour une valeur bien déterminée de la puissance et du coefficient d'asservissement α , les oscillations du niveau de la cheminée. Il a été possible de tracer, à partir de ces relevés, les courbes donnant l'amortissement de ces oscillations pour différentes valeurs de puissance et du coefficient α : les graphiques II, III et IV sont relatifs à des puissances de 35, 28 et 17 MW. Sur chacun d'eux, on peut remarquer qu'il a été possible d'aller jusqu'à l'entretien des oscillations

dans le fût de la cheminée (rapport de deux oscillations successives égal à 1) et même de les amplifier.

Les calculs effectués précédemment permettent de comparer cet amortissement à l'amortissement théorique obtenu à partir des équations classiques. On a négligé la perte de charge dans l'étranglement, car on peut montrer que, pour les petites oscillations, son influence est très faible.

Pour calculer la perte de charge maximum (c'est-à-dire dans le sens de la descente) dans l'étranglement, au cours d'une oscillation du niveau de la cheminée, nous supposons que l'amplitude de cette oscillation est égale à 1 mètre, valeur qui n'a été que rarement dépassée au cours des essais. Le niveau de la cheminée obéit alors à la relation :

$$Z=1 \sin \frac{2 \pi t}{T}$$

T étant la période de la cheminée, que nous prendrons égale à 400 secondes.

La vitesse maximum de variation du niveau est alors :

$$\left(\frac{dZ}{dt}\right)_{\max} = \frac{2 \pi}{400} = 0,016 \text{ m/s}$$

L'étranglement crée une perte de charge de 17 mètres lorsque la vitesse dans la cheminée est celle correspondant au régime permanent de débit maximum de deux groupes, soit 87 m³/s. Cette vitesse est alors de 0,5 m/s.

On en déduit la perte de charge maximum :

$$R=R_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 = 17 \left(\frac{0,016}{0,5}\right)^2 = 1,7 \text{ cm}$$

Elle est donc négligeable et nous ne l'avons pas fait intervenir dans nos calculs d'amortissement. Les pertes de charge dans la galerie ont été calculées d'après les résultats des essais de réception de l'usine.

En définitive, les droites d'équation :

$$\alpha = \pi \left[2 p_0 - \frac{\alpha}{h'_0} \right]$$

(équation 6) sont portées en trait plein sur les graphiques 2, 3 et 4 qui correspondent à des puissances de 35 MW, 28 MW et 17 MW.

Les graphiques 2, 3 et 4 indiquent que l'amortissement mesuré est toujours plus grand que celui prévu par la théorie (droite en trait plein); néanmoins, si on considère le retard de 20 secondes

qui a été introduit à la commande du vannage et que l'on introduise le terme correcteur calculé plus haut, on obtient les droites en pointillés qui, compte tenu de la dispersion des mesures, semblent être en accord avec les résultats expérimentaux. La correspondance est bonne pour le graphique 2 (puissance de 35 MW), mais les résultats divergent légèrement pour l'essai à 28 MW et davantage pour celui à 17 MW (graphiques 3 et 4). Ceci tient au fait que, pour l'essai à 17 MW par exemple, l'énergie cinétique dans la galerie est environ dix fois plus faible que pour l'essai à 35 MW, alors que, les oscillations ayant approximativement même amplitude dans tous les cas pour faciliter les mesures, la perte de charge dans l'étranglement reste la même. Elle devient par conséquent d'autant plus importante dans l'essai à faible puissance, conduisant à un amortissement supérieur, ainsi qu'on peut l'observer sur les graphiques 3 et 4.

Comme nous le remarquons plus haut, le retard à la commande existe toujours dans la pratique, où le régulateur des groupes est utilisé pour réaliser la loi :

$$\Delta Z + A \Delta X = 0$$

et où le retard introduit est fonction du temps de lancer du groupe, de la caractéristique fréquence-puissance du réseau, de l'insensibilité du régulateur, de la vitesse d'ouverture du vannage.

L'intérêt de cette étude du retard à la commande du vannage est donc de montrer l'importance relativement considérable qu'un léger retard peut avoir sur l'importance de l'amortissement. Ceci pourrait être une des raisons pour lesquelles un certain nombre d'expérimentateurs n'a pas pu obtenir des oscillations de cheminées d'équilibre (1), alors que les cheminées étudiées étaient de section notablement inférieure à la section de Thoma.

En conclusion, il est possible de dire que les équations admises pour le calcul des cheminées d'équilibre sont vérifiées par nos résultats expérimentaux, mais que, d'autre part, il est très difficile de se placer dans les conditions théoriques correspondant à l'établissement de ces équations, c'est-à-dire à puissance rigoureusement constante. On peut dire que pratiquement la marche à puissance constante se trouve plus ou moins teintée de marche à vannage bloqué.

(1) E. SCIMEMI, A. GHETTI : Compte rendu du congrès de Padoue, octobre 1947. *Electricité de France*, traduction n° 41.

INFLUENCE DE L'ASSERVISSEMENT DU VANNAGE AU NIVEAU DANS LA CHEMINÉE AU MOYEN DE L'APPAREIL DE TÉLÉRÉGLAGE DE L'USINE DE CORDÉAC

Les essais précédents ont montré que l'amortissement est assez faible lorsque le paramètre α est voisin de 1, ce qui caractérise l'exploitation courante à puissance constante. Pour amortir plus énergiquement les oscillations dans la chambre d'équilibre, la solution la plus simple est d'agir sur le vannage en ouvrant celui-ci lorsque le niveau dans la cheminée monte, par exemple. Le dispositif envisagé doit alors commander le plus vite moins vite. Mais celui-ci règle seulement au départ la vitesse de déplacement du vannage, ce qui introduit un retard pouvant entraîner une instabilité. Pour combattre ce retard, on peut envisager deux solutions :

1° Soit opérer en chaîne d'asservissement fermée, c'est-à-dire en renvoyant dans l'appareil de commande l'indication de la position du vannage.

On obtient alors une loi de la forme :

$$A(X - X_0) + B \frac{dx}{dt} = Z - Z_0 \quad (1)$$

La série des essais précédents réalisait cette loi par intervention manuelle, mais avec $B=0$.

2° Soit de rattraper le retard en injectant dans l'appareil de commande le niveau dans la cheminée d'équilibre et la dérivée de celui-ci.

On obtient alors une loi de la forme :

$$\frac{dx}{dt} = K_1 (Z - Z_0) + K_2 \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

Cette loi de commande a pu être réalisée avec un appareil déjà existant. En effet, la stabilité de marche du complexe Sautet-Cordéac est obtenue en exploitation normale grâce à un appareil automatique de réglage agissant sur l'ouverture des turbines du Sautet et de Cordéac, de manière à maintenir constants les niveaux dans la cheminée, d'une part, et dans le contre-barrage, d'autre part.

Pour ce faire, l'appareil mesure ces deux niveaux appelés respectivement hc et hb , prend en compte leur vitesse de variation $d hc/dt$ et $d hb/dt$ et lance des impulsions sur la commande du plus vite moins vite des turbines du Sautet, d'une part, et de Cordéac, d'autre part (en leur affectant un signe contraire selon l'usine sur laquelle elles sont dirigées). Ces impulsions sont toujours de durée constante et leur fréquence dépend de l'écart entre la valeur de consigne et la valeur à contrôler.

Cet appareil de télérégulation a pu être adapté pour réaliser la commande (2) en supprimant l'action des paramètres du contre-barrage (hb et $d hb/dt$).

L'appareil réalisait alors la norme :

$$N = K_1 hc + K_2 \frac{d hc}{dt}$$

hc étant le niveau dans la cheminée.

Toutefois, il ne la réalisait que de façon approchée car, pour éviter un travail constant aux régulateurs, on lui a ménagé, de construction, une certaine marge d'insensibilité. L'appareil ne lance une impulsion sur le plus vite moins vite que lorsque la norme :

$$N = K_1 hc + K_2 \frac{d hc}{dt}$$

varie d'une certaine quantité ΔN que nous avons pu calculer pour les différents essais réalisés et que nous avons toujours trouvée égale à $0,011 \text{ m}^3/\text{s}$ environ.

Les résultats des essais effectués permettent de tirer les conclusions suivantes :

1° La mise en service de l'appareil stabilise rapidement les oscillations de grande amplitude; il envoie alors plusieurs impulsions par demi-période. Sur le graphique 7, nous avons reporté un essai effectué dans les conditions du paragraphe précédent (asservissement manuel du vannage au niveau dans la cheminée) et un essai effectué au moyen de l'appareil de télérégulation dans les mêmes conditions de fonctionnement ($W=35 \text{ MW}$).

Si, dans ce cas, on suppose que le fonctionnement de l'appareil est tel que le réglage du vannage puisse être considéré comme réalisé de manière continue et non par impulsions successives, on peut déterminer l'amortissement des oscillations par le calcul, de la même manière que dans le paragraphe précédent.

On trouve alors un amortissement de la forme e^{-at} avec $a=0,75$; le même coefficient déduit de la courbe d'essai a pour valeur $a'=0,88$.

Là encore, l'amortissement est plus grand que ne le prévoit la théorie, mais la remarque faite précédemment au sujet du déphasage entre la grandeur réglée et la grandeur de réglage reste vraie et l'insensibilité de l'appareil de télérégulation, qui ne réagit que pour une variation de débit de $0,011 \text{ m}^3/\text{s}$, ne fait qu'accroître cet écart.

2° Lorsqu'il s'agit d'oscillations de faibles amplitudes, le comportement de l'appareil dépend

essentiellement de la valeur des coefficients K_1 et K_2 , ainsi qu'on peut le voir sur le graphique 8.

Si K_1 et K_2 sont faibles, le seuil d'insensibilité de l'appareil, toujours égal à $0,011 \text{ m}^3/\text{s}$, est du même ordre de grandeur que la variation de la norme de réglage, l'appareil n'envoie que de rares impulsions et l'amortissement des oscillations est comparable à l'amortissement que l'on obtiendrait en maintenant le vannage bloqué :

$$z = -0,5$$

Si K_1 et K_2 sont grands, une faible variation de hc ou de $d hc/dt$ permet à la norme de réglage de varier de $0,011 \text{ m}^3/\text{s}$ par seconde et l'appareil envoie de nombreuses impulsions. Ces impulsions, toujours en durée égale, forcent le régulateur du groupe à travailler presque sans in-

terruption et de façon trop importante; il s'ensuit nécessairement un pompage de la machine qui entretient et même provoque des oscillations de faible amplitude dans la cheminée.

Il n'a malheureusement pas été possible de modifier sur place le taux d'insensibilité de l'appareil qui, de ce fait, se serait trouvé dérégulé et inapte à reprendre son fonctionnement normal dès que les exigences de l'exploitation le demandaient.

Bien que l'appareil de télé réglage installé à Cordéac réponde parfaitement à sa fonction qui est de stabiliser la marche de deux usines en série, il ne semble toutefois pas être directement utilisable pour augmenter l'amortissement des petites oscillations dans une cheminée d'équilibre de section voisine de la section de Thoma.

INFLUENCE DE L'ASSERVISSEMENT DE LA TENSION AUX BORNES DE L'ALTERNATEUR AU NIVEAU DANS LA CHEMINÉE

Les essais à tension variable ont été effectués sur résistance liquide. La vitesse du groupe était maintenue à sa valeur normale au moyen du régulateur de vitesse et la tension aux bornes de la machine était asservie au niveau dans la cheminée d'équilibre, suivant une loi de la forme :

$$\Delta U + K \Delta Z = 0$$

Cette condition était réalisée pratiquement en faisant coïncider deux spots lumineux sur une règle, l'un représentant la tension aux bornes de l'alternateur, l'autre le niveau dans la cheminée d'équilibre. La coïncidence des deux spots a été effectuée manuellement en agissant sur le régulateur de tension du groupe.

Les résultats bruts se présentent sous forme de diagrammes identiques aux diagrammes précédents. Les exigences de l'exploitation n'ont cependant pas permis d'obtenir sur résistance liquide la gamme des puissances étudiées au cours de la première partie; seuls, quatre essais à 14 MW ont pu être effectués.

Comme le groupe fonctionne sur résistance liquide, la puissance est donnée par la relation :

$$W = \frac{U^2}{R}$$

donc :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{2} \frac{\Delta W}{W}$$

d'autre part :

$$W = Q H_n \eta$$

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta H_n}{H_n} + \frac{\Delta \eta}{\eta}$$

qui peut encore s'écrire :

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta H_n}{H_n} + \frac{\Delta \eta / \eta}{\Delta W / W} \frac{\Delta W}{W}$$

Soit, en appelant φ la pente de la courbe de rendement tracée en valeurs relatives :

$$\frac{\Delta W}{W} = \left(\frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta H_n}{H_n} \right) \frac{1}{1 - \varphi}$$

La relation (1) peut donc s'écrire :

$$\frac{U}{2(1 - \varphi)} \left(\frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta H_n}{H_n} \right) + K (\Delta H_n + 2 \lambda' Q \Delta Q) = 0$$

soit :

$$\frac{\Delta Q}{Q} \left(\frac{U}{2(1 - \varphi)} + 2 K \lambda' Q^2 \right) + \frac{\Delta H_n}{H_n} \left[\frac{U}{2(1 - \varphi)} + K H_n \right] = 0$$

On voit qu'on obtient à nouveau une loi de la forme :

$$Q H_n^a = \text{constante}$$

avec :

$$a = \frac{U + 2 K H_n (1 - \varphi)}{U + 4 K \lambda' Q^2 (1 - \varphi)}$$

Nous avons tracé sur le graphique 9 la courbe expérimentale donnant le coefficient logarithmique d'amortissement a

$$\text{tiré de } Z = Z^* e^{-at} \sin \frac{2 \pi t}{T^*}$$

en fonction de K .

A titre de comparaison, nous avons reporté sur

le même graphique les courbes d'amortissement relatives aux puissances de 17 MW, 28 MW et 35 MW obtenues par asservissement manuel du vannage au niveau de la cheminée au cours de la première série d'essais.

Cette comparaison montre l'efficacité de l'asservissement de la tension de l'alternateur au niveau de la cheminée d'équilibre pour réduire les oscillations du plan d'eau dans celle-ci, au

moyen d'un dispositif qui semble pouvoir être facilement réalisé dans une installation destinée à fonctionner à tension variable. Notons cependant que l'amortissement supérieur rencontré ici n'est dû qu'à la présence du régulateur, qui est introduit à nouveau dans ces essais pour régler la fréquence et qui ajoute son retard propre à la commande du vannage, augmentant ainsi la stabilité de l'installation.

CONCLUSION

L'ensemble des résultats tirés des essais effectués à l'usine de Cordéac permet de dégager les conclusions suivantes :

Au cours de la première partie, nous avons pu vérifier que les équations généralement admises dans l'étude des oscillations en masse des cheminées d'équilibre fournissent un accord satisfaisant avec l'expérience. Il est toutefois nécessaire d'effectuer des corrections dues à la présence de retards introduits par la chaîne de réglage. La nécessité de ces corrections permet d'interpréter certains résultats obtenus dans la nature par d'autres expérimentateurs et qui semblent en contradiction avec la théorie de D. Thoma.

Dans la deuxième partie, nous avons recher-

ché un moyen d'augmenter l'amortissement des oscillations de la cheminée d'équilibre. L'adaptation d'un appareil déjà existant et qui permettait l'introduction de la vitesse de montée du plan d'eau dans la cheminée n'a pas donné les résultats escomptés, à cause de la marge d'insensibilité de l'appareil nécessaire en exploitation normale.

En marche à tension variable, l'asservissement de la tension au niveau dans la cheminée a permis d'obtenir un amortissement supérieur.

En définitive, bien que la théorie de D. Thoma paraisse convenir à l'étude d'un problème de stabilité de cheminée d'équilibre, l'imperfection des appareils de réglage nécessite souvent l'introduction de corrections particulières à chaque cas.

GRAPHIQUE 1. — Essai à 38 MW $\alpha = 1,2$
Enregistrement des oscillations du plan d'eau dans la cheminée et derrière le contre-barrage

GRAPHIQUE 2. — Essai à 35 MW

GRAPHIQUE 3. — Essai à 28 MW

GRAPHIQUE 4. — Essai à 17 MW

GRAPHIQUE 5. — Enregistrement des oscillations libres de la cheminée d'équilibre

GRAPHIQUE 6. — Enregistrement simultané de l'indication du limnigraphe et de la pression dans la galerie

GRAPHIQUE 7. — Comparaisons des amortissements obtenus avec l'appareil de télé réglage et avec l'asservissement manuel

GRAPHIQUE 8. — Asservissement du vannage au moyen de l'appareil de télé réglage

GRAPHIQUE 9. — Essais sur résistance liquide
 Comparaison avec l'amortissement obtenu par asservissement du vannage

DISCUSSION

Président : M. Maurice GABRIEL

En terminant son exposé, M. HUG rappelle que M. AILLERET a eu l'idée de ce travail et que MM. CHEVALIER et LAURENT y ont largement participé.

M. le Président félicite M. HUG de la manière brillante dont il a exposé ce travail.

M. AILLERET souligne le résultat très intéressant du travail de MM. HUG et CHEVALIER : à savoir que l'expérience vérifie la valeur technique de la condition de Thoma, et efface les doutes qu'elle avait pu laisser à la suite de conclusions de M. SCIMEMI; il était utile de faire

cette vérification accompagnée des corrections nécessaires.

M. AILLERET ajoute deux indications à cette communication, l'une pour le passé, l'autre pour l'avenir.

Pour le passé, M. AILLERET rappelle les raisons qui avaient conduit à prévoir, dans le projet de la centrale de Cordéac, une importante cheminée d'équilibre : incertitude, encore plus grande à l'époque qu'actuellement, sur la rugosité des galeries déterminant le coefficient d'amortissement; risque d'oscillations de réglage entre les deux centrales de Cordéac et du Sautet, couplées dans des conditions assez délicates, parce que la réserve d'eau qui

les sépare est très faible vis-à-vis du débit normal des deux usines. Cependant, en prévision des interconnexions réalisées par la suite, M. AILLERET avait pensé que l'on pouvait réduire les dimensions de la cheminée de Cordéac et éliminer le risque inhérent à cette réduction en asservissant la puissance fournie par la centrale à la hauteur d'eau dans la cheminée et à la dérivée de cette hauteur par rapport au temps.

Pour l'avenir, l'automate, asservi à la hauteur de façon à augmenter les oscillations de la cheminée, pourrait être réglé pour que la centrale de Cordéac fonctionne mal, c'est-à-dire pour que la cheminée soit constamment au voisinage de l'oscillation. Il serait intéressant d'étudier le comportement d'une telle cheminée dans le régime variable imposé par la régulation du réseau, suivant des lois que l'on ne peut analyser que statistiquement, mais qui peuvent produire des variations plus ou moins proches de la résonance avec l'oscillation de la cheminée. On pourrait donc, par le jeu de ce mécanisme, prévoir ce qui se passerait si la section de la cheminée était supérieure, égale ou même inférieure à celle de la condition de Thoma.

Il semble, en effet, que délibérément, il faudrait cesser de faire intervenir la condition de Thoma et calculer uniquement les cheminées d'équilibre pour le problème principal qui subsiste même en grande interconnexion : le problème du déclenchement, c'est-à-dire de la fermeture totale. Il y a dans certains cas, une seconde condition à remplir : la condition de pouvoir ouvrir ; elle était impérative pour l'exploitant d'autrefois, toujours exposé à un incident sur son réseau, qui l'obligeait à connecter ou à charger rapidement une usine différente de la centrale arrêtée ou isolée par l'incident ; il importait donc de calculer la cheminée, en particulier quand elle était déversante, en fonction de la possibilité d'ouverture. Dans le système actuel d'interconnexion du réseau français, un appel rapide de puissance hydraulique ne peut se produire que dans la zone nord où la production hydraulique est très faible ; c'est là seulement qu'il conviendrait de calculer les cheminées en fonction de la possibilité d'ouverture rapide. Dans la zone sud, où l'hydraulique est en majorité, on pourra se contenter d'une ouverture relativement lente.

Par ailleurs, il n'y a aucune difficulté d'asservir la fourniture de puissance de la centrale hydraulique à la pression au bas de la conduite forcée. Nous n'aurons donc aucune oscillation d'ensemble à craindre. D'ailleurs, si le système oscille, on peut monter un automate pour constater le moment dangereux de l'oscillation et bloquer la manœuvre du vannage. Mais la condition de Thoma ne mérite pas, dans le réseau français, les sommes d'argent que l'on dépense en se basant sur elle pour la construction des cheminées.

Il semble, d'ailleurs, que cela soit encore vrai pour les usines fonctionnant seules : dans ce cas, si la section de la cheminée calculée pour absorber les variations dues à l'ouverture et à la fermeture totales, est inférieure à celle qu'imposerait la condition de Thoma, il suffit de déterminer le degré d'asservissement du mécanisme régulateur à des caractéristiques hydrauliques ou électriques de telle sorte qu'il amortisse les oscillations.

En conclusion, M. AILLERET pense, qu'après la vérification de la condition de Thoma et l'indication des précautions à prendre en cas de retards dans les mesures, questions qui font l'objet de la communication de MM. HUG et CHEVALIER, il faut maintenant aborder le problème de nouveaux réglages et de leur incidence sur les oscillations. Pour bien poser ce problème, le meilleur moyen serait de choisir une centrale juste à la limite de l'instabilité et d'y enregistrer les oscillations provoquées par la nouvelle régulation. (Applaudissements).

M. le Président félicite M. AILLERET de ses admirables projections sur l'avenir et lui demande s'il n'est pas gênant que le régulateur et la cheminée oscillent d'une manière permanente dans le cas de la remise en parallèle.

M. AILLERET indique qu'un synchrocoupleur automatique couple sans difficulté dans ces conditions.

M. le Président observe que l'on peut objecter l'usure des mécanismes, mais cela ne doit guère intervenir en raison de la rareté et de la brièveté de ces incidents.

M. HUPNER demande à M. AILLERET s'il n'y a pas une certaine utilité à penser au fonctionnement en réseau isolé, en cas de guerre par exemple.

M. AILLERET estime qu'un tel isolement concernerait le plus souvent des ensembles assez grands pour que, même à l'intérieur de ceux-ci, le problème se pose déjà sous la forme envisagée pour les grands réseaux interconnectés. Dans le cas très rare d'une coupure plus locale, dans laquelle il ne resterait que deux ou trois centrales débitant sur une ville, on serait exposé à des fluctuations de puissance, d'ailleurs assez faibles, et à des oscillations de fréquence dans des limites restreintes sans graves conséquences.

M. le Président objecte seulement que les régulateurs seraient en mouvement perpétuel.

Dans ce cas, précise M. AILLERET, un très bon moyen de stabilisation est le réglage de la tension au moyen d'un élément voltmétrique rendu systématiquement sensible à la fréquence et agissant sur l'excitation de l'alternateur, de manière à faire varier légèrement la tension en sens inverse de la fréquence. Un tel réglage, sans effet dans une interconnexion large, est très efficace dans un tout petit réseau.

M. HUPNER demande si les trois cheminées propres à chacun des groupes de la centrale de Jouques, qui sont reliées entre elles par une galerie de communication, satisfont, soit individuellement soit globalement, à la condition de Thoma en cas de déclenchement d'un seul groupe. D'autre part, M. HUPNER voudrait savoir si la disposition adoptée l'a été d'un point de vue hydraulique ou simplement en raison de la topographie des lieux.

M. DURANTON indique que les chambres d'équilibre de l'Aménagement de Jouques, en cours de réalisation sur la Basse-Durance, ont été calculées dans un but d'économie suivant les principes exposés par M. AILLERET.

Elles ne satisfont pas à la condition de Thoma et les dispositions prévues sont analogues à celles adoptées pour la chambre d'équilibre de l'aménagement qui dérive les eaux de la Rhue dans la retenue de Bort et qui est en service depuis plusieurs années.

Le but essentiel de la dérivation de la Rhue étant l'alimentation de la retenue de Bort, la production annexe d'énergie entre la Rhue et Bort a pu s'accommoder de conditions d'exploitation très libérales.

Une adduction directe des eaux dans la retenue est prévue en cas d'arrêt du groupe à contre-pression qui assure cette production d'énergie. La chambre d'équilibre déverse donc dans la bêche de restitution directe et a été ainsi dimensionnée au plus juste pour satisfaire à la fermeture pratiquement instantanée du groupe. L'ouverture, au contraire, s'effectue progressivement en moins de 10 minutes, par fractions successives, et d'après les oscillations du plan d'eau dans la chambre d'équilibre qui sont retransmises sur le tableau de l'usine. Enfin, un limiteur d'ouverture interdit les fausses manœuvres et contribue à la stabilité du fonctionnement en cours d'exploitation.

La chambre d'équilibre ainsi obtenue est particulièrement économique et sa section, notamment, est très inférieure à celle exigée par la condition de Thoma : elle est de l'ordre du 1/10^e de cette dernière.

A l'appui des remarques de M. AILLERET, M. ESCANDE rappelle que M. GADEN indiquait, il y a déjà plusieurs années que, lorsque la puissance du réseau dépasse trois fois la puissance d'une centrale, il n'y a plus de problème de stabilité ; par conséquent, en France, et sous réserve des découplages intempestifs signalés par M. HUPNER la condition de Thoma est sans objet.

Le problème se pose toutefois, dans le cas de grandes usines isolées, comme le sera, sans doute pour quelque temps, l'usine d'Inga, en projet sur le Congo, avec une production de 20 millions de kW.

Se référant aux travaux de M. GARDEL sur l'asservissement temporaire de la puissance électrique à la puissance hydraulique, M. ESCANDE rappelle qu'à une variation relative de la hauteur de chute par suite d'une oscillation à un moment donné correspond une variation relative dans un rapport k ($k < 1$) de la puissance électrique : dans ces conditions, et dans la limite de validité des hypothèses de calcul, l'équation de Thoma montre que la section limite devient la section de Thoma multipliée par $1 - k$. On peut donc limiter la variation de la section, dans la mesure où l'on peut admettre un certain écart de la puissance électrique par réglage de la tension seule (récepteurs purement ohmiques) ou par réglage combiné de la tension et de la fréquence (cas le plus commun).

D'autre part, il convient d'étudier d'assez près le problème de l'arrêt intempestif du réseau ou de l'usine et des conséquences du déversement de la cheminée, envisagé par M. AILLERET (pénétration de l'air dans les conduites).

Sous ces réserves et hormis le cas un peu acrobatique de l'usine de Jouques où les expérimentateurs sont arrivés à maintenir la stabilité à condition d'ouvrir et de ne pas opérer à contre temps, M. ESCANDE pense qu'en France, nous manquons de cheminées d'équilibre qui n'obéissent pas à la condition de Thoma. Enfin, il trouve très intéressante l'idée de M. AILLERET d'avoir un système de réglage qui permette, sur nos cheminées naturellement stables, de créer au contraire de l'instabilité, de façon à sonder la théorie elle-même, à voir si toutes les hypothèses, en particulier l'hypothèse de linéarisation, sont valables, et dans quelles limites. Il est donc très intéressant de poursuivre ces expériences en choisissant une usine où la cheminée a une section bien définie et exemple de tuyau d'aération qui crée une discontinuité dans la section.

M. RANSFORD remarque que, pour des valeurs de section inférieures à celles qui résultent de la condition de Thoma, l'amplitude des oscillations croît d'abord en fonction de la section, de zéro jusqu'à un maximum correspondant à $\omega/2$, puis décroît jusqu'à zéro : ceci explique ce qu'a indiqué M. HUG, à savoir que jusqu'au $1/10^e$ de la section de la chambre, la cheminée assure une stabilité presque totale.

A la suggestion, due à M. AILLERET, d'asservir la fré-

quence à la hauteur de l'eau au pied de la cheminée d'équilibre, M. RANSFORD objecte la difficulté de mesures exactes et fidèles en ce point en raison de la turbulence qui s'y développe.

M. AILLERET répond qu'il est facile de faire disparaître ces effets tourbillonnaires si l'on prend la moyenne des mesures, étalées dans le temps, de deux ou trois limni-graphes placés dans des puits et si l'on corrige le retard introduit de ce fait par la prise en compte d'une dérivation dans le système de régulation.

Les dispositifs d'asservissement sont maintenant devenus très sûrs et on leur confie des sécurités qui sont plus graves que celle qu'impose une oscillation de cheminée d'équilibre. On peut, d'autre part, introduire des retards dans tout système de réglage et notamment dans celui-ci, qui concerne un phénomène lent; on travaille, d'ailleurs, à réduire cette constante de temps par des techniques mécaniques.

M. RANSFORD précise qu'il veut parler de l'asservissement de la tension et de la fréquence à l'altitude de l'eau au pied de la cheminée. A sa connaissance, le système n'a été expérimenté qu'en Suisse et on n'est pas encore arrivé à résoudre ce problème.

M. RANSFORD remarque, d'autre part, que pour les puissances faibles, l'écart entre la théorie et les expériences est le plus important. Précisément, c'est ce à quoi on s'attendrait en considérant l'effet de rendement comme une correction supplémentaire à apporter aux résultats expérimentaux bruts. Le récent livre de M. GARDEL donne des précisions intéressantes sur cette question.

M. RANSFORD voudrait poser une autre question qui se rattache directement à la précédente. « Si vous me permettez de faire une boutade, dit-il, M. le Président GARDEL dirait certainement que, à Cordéac, les turbines ont une courbe de rendement excellente; toutefois, cette courbe accuse une forte pente. A-t-on tenu compte de cette pente dans l'analyse des résultats? »

M. HUG répond que de nombreux termes correctifs ont été ajoutés dans la définition de la section de Thoma : perte de charge dans la conduite, pente de la courbe de rendement; qu'il a tenu compte de la perte de charge dans la conduite et, d'autre part, que la pente de la courbe de rendement n'intervient pas, puisque l'on ne règle pas en fait la puissance constante, mais en maintenant le produit QH_n constant. Il a surtout voulu introduire un élément, nouveau à sa connaissance : le retard à la commande.