Mesure du rendement des turbines hydrauliques par la méthode thermométrique Poirson

Efficiency measurements for hydraulic turbines by the Poirson thermometric method

PAR G. WILLM ET P. CAMPMAS,
INGÉNIEURS A L'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

La méthode thermométrique de calcul du rendement des turbines et des pompes hydrauliques est basée sur la variation de température que subit l'eau pendant son passage dans la machine. — Justification théorique développée de la méthode et expression du rendement dans le cas le plus général. Analyse des causes d'erreur, indication de leurs ordres de grandeur. Description d'un appareillage établi en vue d'un emploi industriel sur des chutes comprises entre 100 et 1 000 m. Modalités générales d'expérimentation, compte tenu tant de l'étude théorique que de la pratique. — La comparaison des résultats thermométriques et de ceux obtenus en particulier aux moulinets montre, lorsque les conditions expérimentales sont satisfaisantes dans les deux cas, un très bon accord; l'expérience met en évidence la commodité de mise en œuvre de la méthode ainsi que sa rapidité d'exécution et la facilité du déponillement.

The thermometric method of determining turbine and hydraulic pump efficiencies is based on the change of temperature of the water in its passage through the machine.—Theoretical justification of the method and expression for the efficiency in the most general case. Analysis of the causes of error, their order of magnitude. Description of an apparatus intended for industrial use for heads between 100 and 1,000 m. General experimental procedure, comprising theoretical studies and practice.—Comparison of thermometric measurements and those obtained by current-meters show good agreement when the experimental conditions are satisfactory in both cases; experience shows the convenience of operation of the method, its rapidity of execution and the ease with which the results are interpreted.

DEUXIÈME PARTIE

Cf. la Houille Blanche, n° 4, 1954, p. 449.

1. Généralités

L'étude théorique précédente nous a conduits au schéma expérimental suivant (fig. 4).

Un procédé quelconque permet, d'une part la mesure de la hauteur de chute nette de la tur-

FIG. 4. — NOTATIONS

$$\eta = \frac{10 P_1 (1 - \alpha) + 427 C (\theta_1 - \theta_2) + z_1 - z_2}{10 P_c (1 - \beta) + \frac{V_c^2 - V_s^2}{2g} + z_c - z_s} \quad (*)$$

C chaleur spécifique de l'eau (cal/g)

P en kg/cm²

V²/2g et z en m

θ en °C

(Σ A) et (Σ B) sections où l'énergie totale de l'eau $u + gH$ est constante ou varie très peu d'un point à un autre.
(Σ e) et (Σ s) entrée et sortie de la turbine où l'énergie hydraulique gH est pratiquement constante dans les sections.

(*) η = rendement de la turbine; α et β = coefficients donnés par les abaques.

bine. D'autre part, dans une section (Σ_A) de la conduite forcée où l'énergie totale $u + gH$ de l'eau est à peu près constante, on soutire de l'eau que l'on amène sans échanges thermiques avec l'extérieur dans un « détendeur calorimétrique » dont l'entrée crée une perte de charge réglable dans de larges limites. Ensuite, cette eau est admise dans une enceinte calorifugée où l'on mesure sa pression P_1 et où l'on compare sa température θ_1 à celle θ_2 de l'eau circulant dans le canal de fuite. Après quoi elle est détendue à la pression atmosphérique et évacuée.

Remarquons immédiatement qu'il est difficile d'éloigner beaucoup le détendeur calorimétrique de la prise de soutirage; un calcul simple permet de fixer les idées: soit un tuyau de 10 m de long, 25 mm de diamètre, calorifugé par 1 cm de caoutchouc mousse transmettant 10^{-4} cal/°C/cm/cm²/s. Sous un débit de 1 l/s, l'eau subirait dans un tel tuyau et sous 1° C de différence de température avec l'ambiante, une variation de 10^{-3} °C.

Or, 1 l/s représente un débit de soutirage important et la distance séparant la conduite forcée des parties accessibles du canal de fuite peut être considérable (elle dépasse parfois 50 m). Aussi, avons-nous placé le détendeur calorimétrique le plus près possible de la sonde de soutirage.

Par suite, outre les qualités ordinairement requises de fidélité, sensibilité et précision, nous demanderons à l'appareillage thermométrique:

- La possibilité de comparer les températures en deux points éloignés;
- La possibilité d'accéder le plus facilement possible au canal de fuite, quels que soient les types de turbines et les dispositions locales.

Nous examinerons successivement:

- La mesure de la différence de température $\theta_1 - \theta_2$;
- La réalisation pratique de la sonde de soutirage et du détendeur calorimétrique;
- La mesure de la pression P_1 et de la hauteur de chute nette.

2. Mesure de la différence de température $\theta_1 - \theta_2$.

A) CHOIX DU TYPE D'APPAREILS.

Pour mesurer industriellement une faible différence de température, nous pouvons faire appel à quatre types d'appareils:

a) Les couples thermo-électriques, séduisants par la sensibilité que l'on peut obtenir; mais il est difficile d'éliminer et même de déceler les forces électro-motrices parasites qui prennent

naissance dans les lignes et les connexions entre couples; d'une façon générale, ce procédé se prête assez mal à la mesure de la différence de température entre deux points éloignés;

b) Les thermomètres à mercure au 1/100° C (*) sont des instruments extrêmement simples. Correctement utilisés, ils ont permis à M. POIRSON et à ses collaborateurs la justification pratique de la méthode thermométrique, mais ils présentent l'inconvénient:

- d'être fragiles,
- d'exiger un accès commode au canal de fuite,
- d'avoir une sensibilité limitée à $5 \cdot 10^{-3}$ °C. Ils conservent cependant leur intérêt pour les mesures de rendement sous chute élevée par détente totale ($P_1 = 0$);

c) Les thermomètres différentiels à tension de vapeur sont également très simples et peuvent être très sensibles suivant le liquide et le manomètre différentiel employés. Les liaisons entre les ampoules contenant le liquide volatil et le manomètre différentiel peuvent être théoriquement très longues pourvu qu'aucune condensation n'y soit possible (**), mais pour le moment, nous manquons d'information sur leur utilisation pratique;

d) Les thermomètres à résistance. C'est le type que nous avons retenu en raison:

- de la possibilité d'éloigner sans inconvénient majeur les points de mesure;
- de l'expérience acquise depuis de nombreuses années dans la thermométrie de haute précision;
- de leur souplesse et de leur commodité d'emploi, les faibles dimensions des résistances et du fil de connexion s'accommodant assez facilement de difficultés d'accès au canal de fuite.

B) DISPOSITIONS DE PRINCIPE.

L'élément sensible, dit « jauge thermométrique », comporte une mince spirale de platine, métal dont les caractéristiques sont bien connues et définies. Un autre métal, le nickel, offrirait un coefficient de température un peu plus important: cet avantage n'a pas paru, à lui seul, suffisant pour justifier son emploi dans le cas présent. Enfin, les semi-conducteurs dits « Thermistors », à très fort coefficient de température, seraient intéressants sous réserve d'une bonne stabilité qui n'est pas toujours obtenue.

Les variations de résistance des jauges sont mesurées avec un pont de WHEATSTONE dont le

(*) Fabrication: Maison Jaquinot, Paris.

(**) Ce que l'on peut obtenir avec des tubes métalliques chauffés par effet Joule.

FIG. 5. — Schéma de montage du pont thermométrique
G = Galvanomètre.

s_3, s_4 = Jauges à résistance de platine.

r_1, r_2 = Résistances 100 Ω .

P_m = Potentiomètre de mesure (résistance totale $\lambda_3 + \lambda_4$).

P_a = Potentiomètre auxiliaire (résistance totale $\lambda_1 + \lambda_2$).

l_1, l_2, l_3, l_4 = Résistance des fils de connexion.

$R_1 = r_1 + \lambda_1 + l_1$
 $R_2 = r_2 + \lambda_2 + l_2$
 $S_3 = s_3 + \lambda_3 + l_3$
 $S_4 = s_4 + \lambda_4 + l_4$ } Résistances des branches du pont.

P = Pile 1,4 V.

I = Interrupteur.

Rh_a = Rhéostat d'alimentation.

mA = Milliampèremètre d'alimentation.

I_p = Inverseur pile.

schéma est reproduit sur la figure 5. Chaque branche du pont comprend :

— une résistance fixe r ou une jauge s ,

— une résistance variable λ ,

— un fil de connexion (ligne) de résistance l .

Les valeurs des branches R et S restent très voisines (écart maximum de l'ordre de quelques %).

Cet appareillage a été à peu près exclusivement conçu pour l'application de la méthode par détection partielle où les différences de température à mesurer sont nulles ou très faibles : aussi avons-nous recherché essentiellement un montage stable et sensible, sa précision étant un peu secondaire.

a) STABILITÉ.

α) Résistances et forces électromotrices de contact.

Les curseurs des deux potentiomètres sont insérés dans la diagonale pile où l'influence des résistances et forces électromotrices de contact est la plus faible et très facile à éliminer.

β) Influence des variations de la température θ des jauges.

Quand les deux jauges sont à la même température θ , le pont doit rester en équilibre quelle que soit la valeur de θ .

Posons :

$$s_3 = s_{03} (1 + a_3 \theta + b_3 \theta^2)$$

$$s_4 = s_{04} (1 + a_4 \theta + b_4 \theta^2)$$

L'équation d'équilibre ::

$$R_1 S_4 = R_2 S_3$$

sera satisfaite quel que soit θ si les coefficients des termes en θ et θ^2 sont nuls.

D'où les conditions :

$$\begin{cases} \frac{s_{03} a_3}{s_{04} a_4} = \frac{\lambda_1 + l_1 + r_1}{\lambda_2 + l_2 + r_2} \\ \frac{b_3}{a_3} = \frac{b_4}{a_4} \end{cases}$$

La première condition peut toujours être satisfaite grâce à un réglage convenable du potentiomètre auxiliaire.

La deuxième condition porte uniquement sur les jauges, mais elle n'intervient guère en raison des faibles valeurs absolues de b_3 et b_4 . En effet, soit $d\theta$ l'erreur introduite par une variation $\Delta\theta$ de la température des jauges :

$$d\theta = 2\theta \left(\frac{b_4}{a_4} - \frac{b_3}{a_3} \right) \Delta\theta$$

Prenons :

$$\theta = 10^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = 1^\circ\text{C}$$

$$\frac{b_4}{a_4} = 1,1 \frac{b_3}{a_3}$$

On trouve $d\theta = 2 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}$, ce qui est très faible.

L'équilibre du pont peut donc être rendu pratiquement indépendant de la température absolue des jauges sans imposer de conditions précises à ces dernières.

γ) Influence des variations de température des lignes.

Elles entraînent des variations dl des résistances de ligne, d'où une erreur sensiblement égale à : (*)

$$d\theta = \frac{(dl_3 - dl_1) + (dl_2 - dl_4)}{s_0 a}$$

Dans le montage adopté, les lignes l_1 et l_3 d'une part, l_2 et l_4 d'autre part, ont même résistance et subissent des cycles thermiques identiques. Par suite, $d\theta$ (théoriquement nul) peut être rendu pratiquement négligeable.

δ) Influence des variations de température des résistances fixes.

Pour mémoire, elles se traduisent par une erreur :

$$d\theta = \frac{dr_1 - dr_2}{s_0 a}$$

(*) Pour $R = S$.

que l'on élimine en choisissant un métal à coefficient de température très faible et en maintenant les deux résistances à la même température.

b) SENSIBILITÉ.

Nous désignerons par :

- E la tension d'alimentation du pont;
- I le courant dans une jauge;
- i le courant de déséquilibre du pont;
- v la tension de déséquilibre du pont (pour $i = 0$);
- δ l'indication de l'appareil de mesure;
- w la puissance dissipée dans une jauge.

Pour un déséquilibre donné du pont, nous devons rechercher le maximum de δ , w restant inférieur à une valeur limite w_0 pour éviter des échauffements sources d'erreurs sensibles.

Nous distinguerons deux cas suivant que l'on mesure i ou v .

a) Mesure du courant de déséquilibre du pont i : galvanomètre.

Soit : G la résistance intérieure du galvanomètre;

k sa sensibilité ($k = i/\delta$).

La valeur de la déviation δ du galvanomètre peut se mettre sous la forme (*) :

$$\delta = \frac{ds}{s} \sqrt{w} \frac{1}{k} \sqrt{S \frac{2SR}{(R+S)[(R+S)G + 2SR]}}$$

$\frac{ds}{s}$ est imposé par la nature des jauges.

Valeur des résistances fixes.

R étant supposé variable, le maximum de δ est très voisin de :

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{ds}{s} \sqrt{w} \frac{1}{k} \frac{\sqrt{S}}{(S+G)}$$

obtenu pour $R = S$, ce qui justifie le choix des quatre branches égales.

Choix de la résistance des jauges et du galvanomètre

Pour un galvanomètre donné $\frac{1}{k} \frac{\sqrt{S}}{S+G}$ est maximum et égal à : $\frac{1}{2k\sqrt{G}}$ pour $S = G$.

(*) Dans le calcul nous avons confondu dS/S et ds/s dont les valeurs sont très voisines. De même, dans certains développements ultérieurs, nous pourrions confondre R et r ainsi que S et s , qui ne diffèrent que de quelques %.

Si nous supposons cette condition réalisée, nous sommes amenés à choisir un galvanomètre à caractéristiques telles que le produit $k\sqrt{G}$ soit minimum.

Parmi les galvanomètres du type SCHLUMBERGER S.P.E. (*), nous pouvons retenir :

--- le SP 2 SD :

$k\lambda = 10^{-9}$ ampères par milliradian;

$G = 120$ ohms; $k\sqrt{G} = 10^{-8}$

--- le SV 4 SD :

$k = 8.10^{-9}$ ampères par milliradian;

$G = 20$ ohms; $k\sqrt{G} = 4.10^{-8}$

L'utilisation de jauges de 20 ohms n'est pas à retenir car il est préférable que la résistance des lignes reste très faible devant celle des jauges.

Nous sommes donc conduits à l'utilisation de jauges de 120 ohms environ associées avec le galvanomètre SP 2 SD. Pour des raisons d'ordre pratique, nous avons adopté :

$s = 100$ ohms

et par suite :

$r = 100$ ohms

Construction des jauges et tension d'alimentation du pont

E est évidemment réglée de manière à ce que $w = w_0$. Pour augmenter w_0 , il faut faciliter au maximum les échanges thermiques entre les jauges et le milieu ambiant en particulier en accroissant les surfaces d'échange. Théoriquement, il suffirait que les deux jauges dissipent de façon identique l'énergie électrique qu'elles absorbent, d'où la grosse importance que présente la réalisation matérielle des jauges et celle d'une bonne convection.

Pour les sondes que nous utilisons actuellement :

$$w_0 = 600 \mu W$$

Donc :

$$E = 2 \sqrt{s} w_0 = 0,5 V$$

Valeur numérique de la sensibilité

Pour une différence de température de $10^{-3} ^\circ C$:

$$\frac{ds}{s} = 3,8.10^{-6}$$

(*) Type adopté en raison de sa robustesse.

Dans les conditions fixées ci-dessus :

$$\delta = 2,2 \text{ milliradians}$$

Le développement du rayon lumineux étant couramment de 75 cm, on voit qu'une différence de température de $1/1.000^\circ\text{C}$ entraîne un déplacement du spot de 1,6 mm.

REMARQUES :

1. Le galvanomètre SP 2 SD (période propre 2,5 s) a une résistance extérieure critique infinie. Aussi, associé à un pont de 100 Ω , est-il très suramorti. Par suite, quand on ne cherche pas une sensibilité nettement supérieure à 10^{-3}°C , on a intérêt à utiliser le SV 4 SD (période propre 1,6 s) dont la résistance extérieure critique est égale à 200 ohms. La position d'équilibre du galvanomètre est alors atteinte beaucoup plus rapidement. Les autres caractéristiques du pont restant inchangées, une différence de température de $1/1.000^\circ\text{C}$ entraîne un déplacement du spot de 0,37 mm qui est aisément lisible.

2. Pour augmenter la rapidité de réponse du SP 2 SD, on peut envisager l'utilisation de jauges de 1.000 ohms qui offrent en outre l'avantage de diminuer l'importance relative des résistances de lignes.

3) Mesure de la tension de déséquilibre du pont v ($i = 0$).

Soit A le coefficient d'amplification ($A = \frac{\delta}{v}$)

Dans ce cas, δ est donné par l'expression :

$$\delta = \frac{ds}{s} A \sqrt{w} \sqrt{S} \frac{2SR}{(R+S)^2}$$

Comme dans le cas précédent, quand R seul varie, δ est maximum pour $R = S$ et égal à :

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{ds}{s} \sqrt{w} A \sqrt{S}$$

On est conduit à augmenter au maximum A et S . Nous remarquerons :

Que toutefois S doit rester négligeable devant la résistance d'isolement des circuits;

Que les caractéristiques de l'appareil de mesure et des jauges ne sont plus étroitement liées comme dans le cas précédent.

La réalisation pratique d'un tel dispositif est actuellement à l'étude.

c) TARAGE ET PRÉCISION.

Supposons que la température de la jauge s_3 varie de $d\theta$. Pour rétablir l'équilibre du pont, on doit faire varier les résistances du potentiomètre de mesure d'une quantité $d\lambda$:

$$d\theta = \frac{d\lambda}{s_{03} a_3} \frac{1 + (s_{04} a_4 / s_{03} a_3)}{1 + 2(b_3/a_3)\theta}$$

b_3/a_3 étant de l'ordre de 10^{-4} , on pourra en général considérer que cette relation (tarage du pont) est indépendante de la température.

Le calcul à priori du tarage exige la connaissance précise d'un certain nombre d'éléments. Il est souvent plus simple de mesurer une différence de température connue (*).

C) DÉTAILS CONSTRUCTIFS.

La qualité du pont est, pour une très grande part, liée au soin avec lequel sont réalisés les différents éléments :

a) LES JAUGES A RÉSISTANCE DE PLATINE.

Il est fabriqué en France (*) des éléments constitués par une spirale de platine noyée dans du verre Pyrex permettant une excellente protection du métal. Cependant, une expérimentation rigoureuse consistant en particulier à faire parcourir à la jauge de petits cycles de température, a mis en évidence des « résidus » d'allure hystérique, suffisamment importants pour entâcher les mesures très précises que nous avions en vue. Par ailleurs, il a été constaté que le coefficient « a » de la formule :

$$s = s_n (1 + a\theta + b\theta^2)$$

n'était pas le même pour le platine libre et pour le platine associé au Pyrex. Ce dernier phénomène s'explique par un effet de « strain-gage » entre le platine et le verre. Cette observation laisse supposer que les résidus, qui, en valeur relative, sont compris entre 1.10^{-4} et 1.10^{-3} suivant les échantillons essayés, sont dus, au moins en partie, aux résidus de dilatation du verre Pyrex, et à des déformations plastiques nées des contraintes qui se développent au contact du platine et du verre du fait de leur différence de dilatation. Une solution consisterait à remplacer le Pyrex par un verre de caractéristiques mécaniques éprouvées, tel celui qui sert à la fabrication des thermomètres et qui, de plus, a un coefficient de dilatation d'environ 8.10^{-6} , beaucoup plus voisin de celui du platine (9.10^{-6}).

(*) En utilisant par exemple un détendeur (cf 1^{re} Partie, paragraphe 7).

JAUGE THERMOMÉTRIQUE.

Cependant, il semble qu'un recuit très soigné, une sélection rigoureuse et le vieillissement diminuent l'importance des résidus, dont l'effet est encore amenuisé en prenant la précaution d'opérer toujours sur un cycle de même sens (c'est-à-dire en réchauffant les jauges avant la mesure, ce qui peut se faire facilement en les faisant parcourir par un courant plus important que le courant habituel). Dans ces conditions le résidu, même après des variations de température de plusieurs degrés, reste généralement insensible, inférieur, en tout cas, à quelques 10^{-4} °C.

Par ailleurs, on peut réaliser des jauges à platine libre : le platine spiralé à la façon d'un filament de lampe « 1/2 watt » est monté sur un support en alumine frittée, matière qui présente, par rapport au verre, le très gros avantage d'un coefficient de conduction thermique environ trente fois supérieur (en $\text{cal}/^{\circ}\text{C}/\text{cm}/\text{cm}^2/\text{s}$, verre : $16 \cdot 10^{-4}$, alumine frittée : $450 \cdot 10^{-4}$).

Les éléments sensibles sont, après recuit, immergés avec le jeu mécanique minimum dans une ampoule de cuivre remplie de pétrole. La sortie des fils se fait dans un tube en chlorure de vinyle ligaturé sur l'ampoule de cuivre. Le

tout est parfaitement étanche et constitue un ensemble très maniable, peu fragile et peu encombrant (diamètre extérieur 8 mm, longueur de la partie sensible 50 mm). Un certain nombre de variantes peuvent être envisagées.

b) LIGNES.

Il faut éviter pour les lignes les conducteurs à brins multiples, car la rupture accidentelle d'un seul brin peut entraîner des dispersions sensibles dans les mesures. On utilise au contraire des conducteurs constitués par un seul fil.

La compensation thermique avec le montage à trois fils ne serait rigoureuse que si :

- les fils avaient exactement même résistance, même nature et même température,
- les résistances fixes et les jauges restaient toujours égales.

Ces deux conditions ne sont pratiquement pas réalisées : défauts de calibrage des lignes, variations de la résistance des jauges avec la température, cycles de températures légèrement différents, etc...

Aussi, pour rendre inférieure au $1 \cdot 1.000$ °C l'erreur qui pourrait être introduite par un défaut de compensation, avons-nous limité à 0,25 ohm la résistance d'une ligne.

Si, par exemple, la jauge aval est à 20 m du poste de mesure, la ligne devra avoir un diamètre de 1,3 mm, et 2,8 mm si la distance est de 100 m. Ces conditions n'ont rien de rédhibitoire.

Une solution permettant de réduire la section des fils consiste à les passer dans une gaine étanche, entourée d'une enveloppe avec circulation d'eau prélevée sur la conduite forcée (par exemple deux tubes souples concentriques de chlorure de vinyle). Dans ces conditions, on pourra avoir la quasi-certitude que les lignes sont pratiquement à des températures très voisines et que les variations accidentelles de ces températures n'excéderont pas 1°; de plus, elles sont facilement contrôlables.

On pourrait enfin utiliser des conducteurs en alliage à coefficient de température nul, quoique l'intérêt de cette solution ne soit pas absolument évident (en particulier, en raison des thermocouples parasites possibles).

L'effet d'une insuffisante compensation thermique des lignes se traduit par une dérive de zéro du pont, d'où l'intérêt de vérifier la stabilité de ce zéro avant et après chaque série de mesures.

c) RÉSISTANCES FIXES.

La confection des résistances fixes doit être entourée de très grands soins. Le fil résistant qui les constitue doit être pris dans la même

(*) Comptoir Lyon-Alemand, à Paris.

coupe, pour que leur comportement thermique soit identique (la recherche d'un coefficient thermique exactement nul est un peu illusoire et d'ailleurs superflue); ce fil doit être bobiné sans contraintes mécaniques et ne doit subir aucune réaction du fait de dilatations thermiques de son support, pour éviter un effet de « strain-gage » analogue à celui qui a été décrit pour les jauges. Enfin, les résistances sont disposées de telle sorte que leurs températures soient toujours identiques tout en laissant la possibilité d'évacuer aisément les calories dégagées : dans ce but, elles sont enfermées dans une enceinte commune à paroi d'aluminium ou de cuivre.

En bref, la confection des résistances fixes doit être entourée d'autant de précautions que celle des jauges.

d) POTENTIOMÈTRES.

Du modèle « hélicoïdal », le potentiomètre de mesure (*) est constitué par un fil calibré enroulé suivant une large hélice d'une dizaine de spires; le curseur suit le fil en se déplaçant au même pas que l'hélice. Cette disposition remplace avantageusement les potentiomètres toriques dont la course est limitée à moins de 360°, et les boîtes à décades. Supposons que les 10 tours d'un tel potentiomètre hélicoïdal correspondent à un très large domaine de réglage de 5 °C : à 500 divisions par tour, une division vaut 1.10^{-3} °C, les divisions étant elles-mêmes interpolables à vue.

Les défauts de linéarité du potentiomètre (défaut d'excentricité, défaut de calibrage ou d'homogénéité du fil résistant) n'ont qu'une incidence du deuxième ordre ou même rigoureusement nulle sur l'exactitude du résultat lorsque l'on opère en détente partielle. De toute façon, un étalonnage du potentiomètre est possible.

Le potentiomètre auxiliaire est analogue, mais il ne comporte qu'une seule spire.

e) CONNEXIONS.

A l'exception de celles de la diagonale « pile », toutes les connexions sont soudées, ce qui élimine radicalement les mauvais contacts et les phénomènes de semi-conductibilité présentés par l'oxyde de cuivre.

f) GALVANOMÈTRE.

Il doit être de construction robuste; les galvanomètres anti-vibratoires SCHLUMBERGER sont particulièrement indiqués. L'instrument est en-

fermé dans un boîtier où le rayon du spot subit un certain nombre de réflexions portant sa distance d'observation à 75 cm tout en conservant à l'ensemble un encombrement réduit (*).

D) MANIPULATION DU PONT

a) RÉGLAGE DU FAUX ZÉRO DU PONT.

Cette opération très simple mais importante a pour objet d'éliminer l'effet des forces électromotrices parasites : les jauges étant en place, l'alimentation du pont coupée, on ramène le spot au zéro de la graduation par le rappel mécanique du galvanomètre. Cet équilibre est sujet à des changements, aussi faut-il le vérifier avant et après chaque mesure, ce qui est du reste instantané.

b) RÉGLAGE DU ZÉRO.

(C'est-à-dire équilibrage du pont pour l'égalité de température des jauges.) Les jauges étant plongées dans la même eau courante, le pont alimenté, on agit sur le potentiomètre de mesure pour ramener le spot au zéro de son échelle. L'inversion de la tension d'alimentation ne doit pas changer le réglage, sinon ce serait signe que le faux zéro s'est déplacé.

Pour contrôler la fidélité des jauges, il est bon de vérifier ce zéro après quelques heures d'essais.

c) RÉGLAGE DU POTENTIOMÈTRE AUXILIAIRE.

Il faut rechercher la position du potentiomètre auxiliaire P_a telle que le pont reste en équilibre quelle que soit la température des jauges. Il suffit, pour une position donnée de P_a , d'observer la dérive du pont entraînée par une variation de température connue (10 °C par exemple). Le déplacement que doit subir P_a est proportionnel à cette déviation, le coefficient de proportionnalité étant pratiquement constant et déterminé expérimentalement. Pour un couple de jauges donné, le réglage de P_a peut être repéré une fois pour toutes en laboratoire.

d) TARAGE DU POTENTIOMÈTRE DE MESURE.

Il suffit de mesurer avec le pont une différence de température exactement connue (par exemple celle résultant d'une détente).

e) TARAGE DU GALVANOMÈTRE.

C'est plutôt l'établissement d'une correspondance entre les graduations du potentiomètre et celles du galvanomètre; le réglage du courant

(*) Fabrication Telec. à Paris.

(*) Stabindex de la maison Sefram, à Paris.

d'alimentation du pont permet de le ramener à un rapport simple qui peut être l'unité. Pratiquement, l'échelle du galvanomètre est établie de façon que ce rapport soit atteint avec un courant d'alimentation très voisin du courant maximum (c'est-à-dire correspondant à la valeur limite de la puissance w_0).

f) MESURE D'UNE DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE.

Le potentiomètre est réglé à une graduation exacte, l'appoint est lu directement en élongation. Pratiquement, on tare le potentiomètre et le galvanomètre non en degrés, mais en mètres d'eau ($1 \text{ m} = 1/427^\circ\text{C}$), ce qui facilite les dépouillements ultérieurs.

g) PRÉCISION ET FIDÉLITÉ DU PONT.

Un pont réalisé avec soin et conformément à la description qui précède montre en essai des dérives accidentelles du zéro en général inférieures à $0,001^\circ\text{C}$ (ou 50 cm d'eau) au cours d'une après-midi de mesure. Des séries systématiques de tarage montrent une constance de celui-ci au cours d'une ou plusieurs journées de l'ordre de $1/1.000^\circ$. Enfin, la plus petite différence de température appréciable en cours d'essai est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}$ correspondant à une chute de 25 cm d'eau environ, cette valeur pouvant descendre en laboratoire à 10^{-1}°C .

3. Soutirage et détendeur calorimétrique

A) SOUTIRAGE

a) PRISE DE- SOUTIRAGE PROPREMENT DITE (fig. 6).

Elle doit prélever l'eau dans la conduite forcée avec son énergie totale.

Une prise dynamique se prête facilement à ce prélèvement et à l'exploration sur tout ou partie d'un diamètre de la conduite : elle permet, d'autre part, une mesure très rapide de :

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\omega} + z$$

au point de soutirage.

Pratiquement, la prise est constituée par un tube cylindrique en acier inoxydable d'un diamètre extérieur de 17 mm, percé en embouchure de flûte à son extrémité, et couissant dans un guide muni d'un presse-étoupe; un système de tiges filetées permet de manœuvrer avec sécurité la sonde même avec de très hautes pressions. Enfin, un repère extérieur permet de vérifier à tout instant l'orientation du trou de la sonde.

FIG. 6. — Prise de soutirage amont.

SONDE DE PRÉLÈVEMENT AMONT.

Le passage de la sonde dans son guide est sommairement calorifugé par une fourrure en matière plastique, la partie de la sonde extérieure à la conduite forcée doit être réduite au minimum et entourée d'une bande de caoutchouc mousse que l'on ajuste à la demande. La calorifugation intérieure de la sonde est recommandable dans certains cas, en raison de l'échauffement de l'eau résultant des pertes de charge à l'entrée. Enfin, un prélèvement supplémentaire d'eau, dit de conditionnement, indépendant du soutirage principal, est destiné à compléter l'isolement du tuyau de liaison au détendeur calorimétrique.

b) TRANSPORT DE L'EAU.

Nous avons déjà vu que la distance entre la sonde de soutirage et le détendeur calorimétrique doit être réduite au minimum : pratiquement le tuyau ne dépasse pas deux mètres. Il est constitué par un tube en caoutchouc « Buna » à haute pression de 16/29 mm, éprouvé à 450 kg, c'est-à-dire donnant même avec les plus hautes chutes une sécurité absolue. Sa calorifugation est assurée par une enveloppe de caoutchouc mousse autour de laquelle est enroulé en spires jointives un tube de chlorure de vinyle où circule l'eau de « conditionnement ».

FIG. 7. — Détendeur calorimétrique.

c) PERTES DE CHARGE DANS LA SONDE DE SOUTIRAGE ET LE TUYAU DE LIAISON.

Ces pertes de charge n'ont en toute rigueur pas d'incidence sur l'exactitude des mesures, puisqu'elles sont exactement compensées par un échauffement. Pour le débit-type de l'installation (0,4 l/s), ces pertes de charge ne doivent toutefois pas excéder environ 5 % de la chute, afin de permettre l'application de la méthode de détente partielle. Le tuyau à âme lisse est à ce titre très supérieur aux tuyaux souples métalliques qui présentent une forte rugosité intérieure.

B) DÉTendeur CALORIMÉTRIQUE

Le schéma de la figure 7 est relatif à un appareil prévu pour des chutes comprises entre 150 et 800 m.

Le circuit de l'eau est le suivant :

- Le tuyau d'amenée est raccordé au « détenteur amont » qui permet le réglage continu des pertes de charge;
- - L'eau est ensuite admise dans l'« enceinte de mesure amont » qui comporte un corps en acier, un doigt de gant pour la mesure des températures (*), une prise statique de pression et un robinet de purge;

DÉTendeur CALORIMÉTRIQUE ET SES DEUX VASES DEWAR.

--- Après avoir traversé l'enceinte de mesure amont, l'eau peut être orientée au moyen d'un robinet trivoie soit vers un « détenteur aval » à 6 positions, soit avec des pertes de charge très réduites, et par l'intermédiaire d'un divergent récupérateur de $V^2/2g$, vers le bac d'eau détendue;

--- A la sortie de ce bac, l'eau est amenée dans une dernière enveloppe (bac de conditionnement) que traversent les différentes commandes pour l'évacuation des calories qu'elles pourraient amener de l'extérieur, puis est définitivement évacuée.

RÉALISATION

La difficulté essentielle réside dans une calorifugation aussi rigoureuse que possible. L'emploi de vases de DEWAR, de mousse de caoutchouc ou de chlorure de vinyle donne d'excellents résultats. Les échanges de calories à la faveur des commandes de vannes, de robinets ou de tuyaux sont réduits au minimum par l'emploi de volants en matière plastique et par le passage de toutes les commandes, d'ailleurs allégées, dans l'eau détendue du « bac de conditionnement ».

Certains échanges de calories se sont révélés particulièrement difficiles à éviter : ce sont ceux qui affectent la jauge à la faveur d'un cheminement dans l'épaisseur des parois des tuyaux et du corps en acier de l'enceinte amont, puis dans l'épaisseur du doigt de gant. L'effet de ces échanges a pu être pratiquement annulé en allongeant la partie inactive du doigt de gant et en la réalisant en acier inoxydable 18/8, dont la conductibilité thermique est environ cinq fois plus faible que celle de l'acier ordinaire et trente fois plus faible que celle de l'ampoule en cuivre rouge contenant la résistance du platine qui lui fait suite. Parallèlement, toutes les épaisseurs de parois sont réduites dans une proportion compatible avec la sécurité (l'enceinte amont est éprouvée à 140 kg).

Enfin, on a été conduit à réaliser le divergent en matière plastique, pour éviter les échanges de calories entre le corps amont plus froid puisque sous pression et l'eau réchauffée par la détente dans l'enceinte aval.

D'une façon générale, une expérimentation rigoureuse, plus que le calcul, a permis de réduire les échanges de calories à une valeur suffisamment faible pour que la variation de température résultante de l'eau soit insensible (c'est-à-dire notablement inférieure à 0,001°C). Un contrôle glo-

(*) Nous utilisons également un détenteur à deux doigts de gant.

bal est facile à effectuer : il suffit de vérifier le débit minimum au-dessous duquel cet échauffement devient mesurable; ce débit doit être franchement inférieur au débit adopté de 0,4 l/s. Des contrôles partiels sont également possibles dans les mêmes conditions.

La réalisation d'une perte de charge variable de façon continue et parfaitement stable dans de grandes limites, a soulevé certaines difficultés. L'introduction à profondeur variable d'un mandrin fileté dans un tube calibré donne satisfaction dans la totalité du domaine de pression où on est appelé pratiquement à opérer, sous réserve que l'eau soutirée ne contienne pas de corps en suspension.

Enfin, la suppression des pertes de charge entre l'enceinte et le bac aval a pu être pratiquement réalisée en utilisant un robinet à boisseau à large passage pouvant fonctionner sous haute pression et en soignant particulièrement la forme et l'état de surface des ajutages convergents et divergents. Cette perte de charge reste cependant de l'ordre de 50 cm pour un débit de 0,25 l/s.

Observons enfin que pour la réalisation de l'enceinte amont il est commode de choisir une section de passage de l'eau telle que $V^2/2g$ à hauteur de l'ampoule de la jauge ait une valeur négligeable. On a admis que cette vitesse ne devait pas excéder 1 m/s, soit 5 cm de $V^2/2g$. Elle doit cependant être suffisante pour permettre une bonne convection avec l'ampoule de la jauge.

DIVERSES UTILISATIONS

a) Mesure de rendement.

Le détendeur aval est réglé à un débit voisin de 0,4 l/s. Ce réglage n'a pas à être retouché en cours d'essai. Un thermomètre à mercure au 1/10 °C est placé dans le bac d'eau détendue.

En agissant sur le détendeur amont, on réalise l'égalité des températures de l'eau dans l'« enceinte de mesure » amont et dans le canal de fuite; enfin, on mesure la pression régnant dans cette enceinte.

b) Mesures de hauteur de chute nette.

Le robinet trivoie étant fermé, on mesure dans l'enceinte amont la pression totale au point de soutirage, pression extrêmement voisine (sauf hétérogénéités importantes de vitesse) de la hauteur de chute nette.

c) Repérage du zéro des jauges.

On réalise l'équilibre du pont :

— Soit avec les deux jauges côte à côte dans le bac aval, le détendeur aval étant en service;

— Soit avec une jauge dans l'enceinte amont et l'autre dans le bac aval. Le robinet trivoie établit alors la communication directe entre les deux enceintes et la détente est effectuée à la sortie de la sonde de soutirage. On doit tenir compte des pertes de charge dans le robinet, mesurées avec un manomètre à eau.

d) Tarage des jauges.

On mesure l'échauffement de l'eau au cours de son passage dans le détendeur aval. On en déduit la correspondance entre les indications du pont de mesure et la pression de détente. On obtient ainsi un tarage direct des appareils en mètres d'eau.

DISPOSITIF ANNEXE. — TENEUR EN GAZ DISSOUS

Un dispositif de dégazage est branché sur l'alimentation en eau. Il est constitué (fig. 8) par un récipient cylindrique de 1 litre, en acier, et muni d'une vanne à chaque extrémité. Un mode opératoire sur lequel nous n'insistons pas permet

FIG. 8. — Dispositif de dégazage.

de le remplir d'eau prélevée dans la conduite forcée, sans aucune détente. Au moment de la détente, le gaz éventuellement dissous se dégage sous forme de minuscules bulles qui restent en suspension dans l'eau. La variation de volume correspondante est repérée par le déplacement d'un ménisque dans un tube transparent. Cette

FIG. 9. — Essai de dégazage de l'eau sous vide partiel
Dégazage de 1 cm³ de gaz (O₂N₂CH₄H₂S)
= 0,15 à 0,20 petite calorie.
Courbe de tension de vapeur saturante de l'eau.

analyse peut être complétée par un dégazage sous vide partiel de l'eau de la conduite forcée et de l'eau du canal de fuite. Le même dispositif peut être utilisé; on aura simplement muni la bouteille d'un manomètre à mercure (constitué très simplement par du flexitub) qui créera et réglera la dépression.

La simple observation des variations de volume sera en général suffisante, les termes cor-

rectifs pouvant être pratiquement considérés comme indépendants de la nature du gaz tant que le volume dégagé reste faible (10 cm³ à 0° et sous 760 mm Hg par litre d'eau par exemple).

C) MESURE DE LA PRESSION P_1 ET DE LA HAUTEUR DE CHUTE NETTE

Les mesures de pression n'offrent aucune difficulté particulière. Des manomètres métalliques de précision ou des presses à étalonner permettent des mesures de pressions stables à 0,2 % et même 0,1 %. Nous utilisons une presse à étalonner entièrement automatique à lecture directe.

En général, on pourra calculer la hauteur de chute nette à partir de la mesure de la pression totale au point de soutirage dans la conduite forcée; on vérifiera simplement au préalable qu'il n'existe dans cette section aucune singularité importante de vitesse et que l'énergie cinétique de l'eau est faible devant sa pression.

Si, par suite de circonstances particulières, ces conditions ne sont pas réalisées dans la section de soutirage, on mesurera la pression statique P_s à l'entrée de la turbine suivant les normes habituelles et l'on calculera $V^2/2g$ à partir de la puissance électrique et du rendement alternateur garanti (formule 6 bis, 1^{re} partie). En général, les compteurs de l'usine permettent une mesure suffisamment précise de la puissance.

TROISIÈME PARTIE

MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE THERMOMÉTRIQUE RÉSULTATS OBTENUS

1. Généralités

Nous devons pour terminer examiner la mise en œuvre pratique de la méthode thermométrique.

Trois points principaux doivent retenir l'attention des expérimentateurs :

- Avant les essais, les choix des sections de prélèvement d'eau en amont et en aval de la turbine;
- En cours d'essai, la stabilité du régime qui est l'une des conditions essentielles de validité des mesures;

Enfin, l'exécution des mesures proprement dites, problème qui a été traité dans la deuxième partie où nous avons indiqué les particularités d'emploi de chaque appareil (*).

2. Choix des sections de prélèvement

L'expression du rendement a été établie en admettant que l'énergie totale (énergie hydraulique + énergie interne) était uniformément répartie

(*) Notons que l'utilisation récente de deux paires de jauges indépendantes permet un contrôle efficace et permanent de la qualité principale des jauges : la fidélité.

dans les sections amont et aval. C'est dans ce cas seulement que le prélèvement peut être effectué en un seul point.

a) Amont de la turbine.

Il est commode de choisir une section éloignée de toute singularité importante et où l'énergie cinétique de l'eau est faible. Dans ce cas on sait qu'une prise située à une distance de la paroi de l'ordre du $1/7$ du diamètre prélève sans difficultés particulières une eau dont l'énergie est extrêmement voisine de l'énergie hydraulique moyenne dans la section. Si, de plus, il n'existe pas de pertes de charge appréciables entre cette section et l'entrée de la turbine, un simple relevé de la pression totale au point de soutirage permet une détermination tout à fait satisfaisante de la hauteur de chute nette (*).

Enfin, *en régime permanent*, nous n'avons encore jamais mis en évidence des hétérogénéités de température dans de telles sections. Toutefois, le hasard a voulu que nous soyons placés à l'aval de galeries ou de conduites assez longues qui assuraient un brassage efficace.

Par contre, si l'on ne peut éviter le voisinage de singularités importantes, il convient de s'assurer de la répartition de l'énergie en déplaçant le point de prélèvement. Il est évident que dans ce cas l'énergie hydraulique est variable, mais l'expérience semble montrer (exemple ROUZE) la constance de l'énergie totale, ce qui permet de prélever l'eau en un seul point. Par contre, on doit renoncer à calculer la hauteur de chute nette à partir de la pression totale au point de soutirage.

Si, par improbabilité, l'énergie totale se montre variable dans la section, on déplace en cours d'essai le point de prélèvement et si les divers rendements ainsi trouvés ne diffèrent pas de plus de 1 % on peut adopter la moyenne des résultats.

Remarquons enfin que :

- Le voisinage immédiat de la section étudiée doit être facilement accessible pour permettre l'installation et la manipulation du matériel;

L'utilisation d'une vanne à passage direct permet la mise en place de la sonde de soutirage dans une conduite forcée sans vider préalablement.

Nous n'avons encore aucune expérience des usines de pied de barrage où les conduites d'amenée peuvent être courtes.

b) Aval de la turbine.

Il faut éviter :

- Un éloignement excessif de la turbine : risques d'échanges thermiques entre l'eau et l'extérieur, surtout en canal découvert;
- Le voisinage immédiat de la roue : risques d'hétérogénéités très importantes dans l'énergie totale de l'eau.

La section aval sera choisie de préférence :

- A la sortie des aspirateurs des turbines Francis (ex. Bancairon, Randens);
- A une dizaine de mètres à l'aval de la fosse des turbines Pelton (Luz, la Siagne).

La jauge aval sera en général introduite directement dans le canal de fuite.

Suivant les conditions locales, on peut utiliser :

- des rainures de bâtardeau d'isolement,
- des tuyauteries d'évacuation de fuites,
- des trous d'homme de groupes voisins,
- des accès spécialement aménagés,
- la sortie de la partie couverte du canal de fuite,
- enfin un soutirage, sous réserve que la pompe soit placée en aval de l'enceinte de mesure.

Quand l'accès le plus commode est éloigné de la conduite forcée, on soude à la jauge aval (qui forme un ensemble entièrement étanche de 5 m de long) une rallonge de câble de grosse section. A Ahrzerouftis nous avons utilisé avec succès 50 m de câble de 25 mm² de section.

Enfin, sauf impossibilité absolue, il faut prévoir la possibilité de déplacer le point de mesure. Ces prospections, qui peuvent être très rapides, ne feront en général apparaître que des différences de température inférieures au $1/1.000$ °C. Cependant, s'il existe des gradients systématiques entraînant des écarts de rendement supérieurs à 1 %, on recherchera une section de mesure plus convenable (à priori plus en aval).

REMARQUE. --- Dans certains cas particuliers, on cherchera au contraire les singularités et les gradients de température pour localiser les pertes et préciser les parties de la machine qui devraient être perfectionnées (mesures dans les labyrinthes et aspirateurs des turbines Francis, dans les bâches des turbines Pelton par exemple).

3. Stabilité du régime

L'établissement de l'expression du rendement suppose que l'on opère en régime permanent.

Régime permanent hydraulique que nous ne

(*) Il suffit que l'erreur possible sur le $V^2/2g$ soit faible devant la pression statique.

citerons que pour mémoire. Notons qu'en réalité, dans les ouvrages industriels, pressions et vitesses ne sont constantes qu'« en moyenne ». On peut voir aisément que si l'amplitude de leurs fluctuations ne dépasse pas 1 à 2 % de la valeur moyenne, leur influence est négligeable.

— Régime d'équilibre thermique où nous distinguerons :

a) Le régime d'équilibre des parties métalliques de la turbine;

b) Le régime d'équilibre de l'eau.

a) L'expérience semble montrer qu'en cours d'essai les changements éventuels de température des pièces métalliques sont sans influence appréciable (*) : en effet, ces pièces ont un poids relativement peu important devant le poids d'eau turbinée et la chaleur spécifique de l'acier n'est que le 1/10 de celle de l'eau. Enfin l'amplitude des variations de température normalement observables est faible. A Ahrzerouftis en particulier nous avons pu vérifier plusieurs fois que la stabilisation des indications du déversoir et de la méthode thermométrique coïncidaient.

b) Par contre, quand la température de l'eau entrant dans la turbine varie, des erreurs parfois très importantes peuvent entâcher les mesures. Ces erreurs peuvent s'expliquer :

1. Par l'inégalité des temps de passage de l'eau à travers la turbine et l'appareillage de mesure de la température amont.

Pour fixer les idées, si cette différence est de l'ordre de 6 secondes, un gradient de $2 \cdot 10^{-2}$ °C/mn introduit dans les mesures une erreur de $2 \cdot 10^{-3}$ °C, donc parfaitement appréciable.

Dans le cas particulier des turbines Pelton, la présence d'une fosse de volume important est alors particulièrement défavorable.

Remarquons toutefois que l'on peut établir un terme correctif, fonction des conditions locales et des variations de température dans le temps. Un tel calcul a notamment été effectué avec succès à l'occasion d'essais à La Règeat, mais le dépouillement s'en trouve compliqué.

2. Par les écarts qui peuvent exister entre les constantes de temps des jauges thermométriques amont et aval. Ici encore on pourrait introduire un terme correctif.

3. Par l'apparition d'hétérogénéités locales de température qui peuvent atteindre plusieurs 1/100 °C.

Ces hétérogénéités entraînent d'ailleurs sur la différence de température mesurée des fluctuations en général rapides et de quelques 1/1.000 °C.

(*) Sauf peut-être dans les premières minutes qui suivent le démarrage du groupe et au cours desquelles aucune mesure n'est généralement effectuée.

Mais il peut arriver que ces fluctuations soient très lentes : nous citerons le cas de la Triouzone (**) où des pseudo-stabilités de quelques minutes étaient séparées par de lentes dérives de plusieurs 1/100 °C, phénomène pouvant s'expliquer par la coexistence (aussi bien à l'entrée qu'à la sortie de la turbine) de plusieurs nappes d'eau de températures différentes et de positions lentement variables.

On pourrait songer à multiplier les mesures (pendant une demi-heure, une heure...) pour obtenir une moyenne correcte. Ce n'est pas toujours suffisant pour éviter une erreur systématique : les températures étant variables dans l'espace et dans le temps, la moyenne d'une série de mesures, même avec déplacement des points de soutirage, n'est pas forcément correcte. Seule une mesure simultanée de température et de vitesse en tous les points de chaque section, suivie d'une intégration, aurait une certaine valeur, mais elle est pratiquement irréalisable. Expérimentalement nous avons effectué au Glandon (***) pendant trois heures une série de 24 mesures en des points variables de la conduite forcée et du canal de fuite. Les valeurs obtenues s'étalent sur une plage de ± 1 % dont le centre de gravité coïncide à mieux que 0,5 % avec le rendement mesuré aux moulinets.

Par contre, à l'usine de Saint-Martin (**) les résultats de deux séries de mesures :

— L'une le matin, la température amont de l'ordre de 10,5 °C augmentant de 10^{-2} °C/mn,

— L'autre le soir, la température amont de l'ordre de 17° diminuant de $1,5 \cdot 10^{-2}$ °C/mn, présentent entre elles un écart de 0,9 %, soit $1,3 \cdot 10^{-2}$ °C.

On peut donc admettre d'une façon générale que la stabilité des températures conditionne impérativement la bonne exécution des mesures de rendement. Aussi est-il vivement recommandé :

- De surveiller les températures de l'eau détendue : si cette température varie trop rapidement (de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ °C/mn), ou si les fluctuations de température excèdent quelques 10^{-3} °C, il est préférable de remettre les mesures à une heure plus favorable : c'est ainsi qu'il est indiqué de profiter des maximums diurnes et minimums nocturnes de la température de l'eau, d'éviter les ensoleillements sur les conduites forcées, les journées particulièrement froides ou chaudes, etc... Pour les mêmes motifs il faut éviter de faire des mesures immédiatement après un démarrage, surtout si les conduites d'amenée sont exposées aux influences thermiques extérieures;

(**) Turbines Francis.

(***) Turbines Pelton.

- De prolonger les mesures pour chaque point de rendement pendant 10 à 15 minutes, même si les indications ont paru stables pendant les premières minutes d'observation.

4. Résultats obtenus — Limites d'emploi

a) ERREURS ACCIDENTELLES.

Dans de bonnes conditions expérimentales (en particulier stabilité des températures de l'eau) on constate que la dispersion des divers résultats relatifs à une même puissance de la turbine reste généralement de l'ordre de $\pm 1/1.000$ °C. Nous pouvons citer par exemple :

- Le Glandon, écart maximum par rapport à la moyenne $1,3 \cdot 10^{-3}$ °C (soit 0,2 % sur le rendement);
- Ahrzeroufflis, écart maximum par rapport à la moyenne 10^{-3} °C (soit 0,1 % sur le rendement).

Au cours du tarage des jauges (mesure d'un rendement nul) on observe également des erreurs accidentelles d'environ 10^{-3} °C, soit 0,1 %, si l'on mesure une différence de température de 1 °C.

b) COMPARAISON AVEC LES AUTRES MÉTHODES DE MESURE DU RENDEMENT (en particulier moulinets).

Cette comparaison est effectuée au cours d'essais simultanés.

Dans de bonnes conditions expérimentales (aussi bien pour les mesures de débit que pour les mesures thermométriques), les écarts maxima ne semblent pas devoir dépasser 1 à 1,5 %, les courbes moyennes obtenues étant en général beaucoup plus voisines.

L'ensemble des comparaisons ne fait pas apparaître un écart systématique entre les méthodes.

Les figures 10 à 18 donnent des résultats de mesures comparatives.

Fig. 10. — Usine du Glandon, mai 1953.
Hauteur de chute 225 m.
Courbes rendement (turbine)/puissance
(sur l'arbre).

Fig. 11. — Usine de Claux,
juillet 1953.
Hauteur de chute 240 m.
Courbes rendement
(turbine)/puissance
(aux bornes
de l'alternateur).

c) LIMITES D'EMPLOI.

Sauf cas exceptionnels les limites d'emploi seront fixées en fonction de :

FIG. 12. — Usine de Saint-Martin, 23 juillet 1953.
Hauteur de chute 620 m.
Courbes rendement (turbine)/puissance (sur l'arbre).

— La précision exigée,

— L'homogénéité de l'énergie totale de l'eau en amont et en aval de la turbine. Ce dernier point constituera peut-être le principal obstacle à l'application de la méthode aux turbines de faible hauteur de chute.

Le matériel actuellement en service permet d'opérer avec succès sur des chutes supérieures à 100 m.

Nous ne possédons pas encore assez d'éléments pour examiner le cas des chutes inférieures à 100 m.

On ne voit guère de limitation vers les hautes chutes sinon un problème de résistance mécanique de l'appareillage (*). Remarquons que dans ce dernier cas on pourra parfois employer avec succès les thermomètres à mercure.

(*) Signalons que pour les turbines à très faible débit, les échanges calorifiques à travers les parois métalliques de la turbine peuvent cesser d'être négligeables.

FIG. 13. — Usine d'Ahrzerouftis (Algérie), novembre 1953.
Hauteur de chute 361,1 m. Groupe n° 1.
Courbes rendement (turbine)/puissance (sur l'arbre).

FIG. 14. — Usine d'Ahrzerouftis, novembre 1953.
Hauteur de chute 361,1 m. Groupe n° 2.
Courbes rendement (turbine)/puissance (sur l'arbre).

FIG. 15. — Usine d'Ahrzeroufflis,
novembre 1953.
Hauteur de chute 106,09 m.
Groupe n° 3.
Courbes rendement (turbine)/puissance
(sur l'arbre).

FIG. 16. — Usine de Fontan.
Essais de mars 1954.
Rendement de la turbine/puissance
sur l'arbre.
(Hauteur de chute nette 100 m.)

FIG. 17. — Usine de Pont-Haut,
septembre 1954.
Puissance maximum 7.000 kW.
Hauteur de chute nette moyenne
195 m.

FIG. 18. — Usine de Randens.
Essais de juin 1954.
Comparaison des rendements.
Groupe n° 1.
Chute nette moyenne 147,5 m.

CONCLUSION

La méthode thermométrique entre actuellement dans le domaine de l'application industrielle sur une gamme de chutes étendue. L'emploi de cette méthode sera très certainement d'un grand secours.

— Pour la localisation des pertes dans les turbines, une meilleure connaissance des points défectueux et l'orientation des efforts tendant à augmenter le rendement. Nous devons signaler qu'à Brommat elle a permis de mettre en évidence qu'une simple réduction du jeu des labyrinthes pouvait réduire les pertes de 400 kW, soit

un gain de 10.000 kWh par groupe et par jour.

Pour l'étude de l'évolution du rendement en fonction de l'usure des turbines. En effet, la méthode ne met en œuvre qu'un matériel et un personnel réduits et n'impose aucune sujétion d'exploitation (même pas l'arrêt des groupes). Par suite, elle sera très précieuse dans l'étude économique des programmes de réparation et de modernisation.

Son principal but sera donc l'amélioration du rendement qui doit rester un des principaux soucis des exploitants.

FIG. 19. --- Exemple d'application de la méthode thermométrique au tarage d'un Venturi. Centrale de Soverzene (Italie) octobre 1954.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

1. Méthode thermométrique pour la mesure du rendement des turbines hydrauliques, de MM. L. BARBILLON et A. POIRSON :
a) *Bulletin des Recherches et Inventions*, septembre 1921.
b) *R.G.E.*, 26 novembre 1921.
2. Méthode thermométrique de mesure du rendement des turbines hydrauliques (BARBILLON et GAILLARD) *R.G.E.*, 28 septembre 1929.
3. Quelques applications de la méthode thermométrique Poirson (FONTAINE). *Houille Blanche*, janvier-février 1951.
4. Séparation des pertes dans une turbine Francis. (FONTAINE et CAMPAS). *Houille Blanche*, avril 1952.
5. Complément à la théorie de la méthode thermométrique. (VOLLE). Note interne E.D.F. du 14-2-1951.