

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 36 (1945)

Heft: 1

Artikel: Le rendement de la production d'énergie de l'usine d'Innertkirchen

Autor: Aemmer, F. / Gerber, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056443>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat de l'Association Suisse des Electriciens
Zurich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:
Zurich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 25 17 42
Chèques postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXXVI^e Année

N^o 1

Mercredi, 10 Janvier 1945

Le rendement de la production d'énergie de l'usine d'Innertkirchen

Par F. Aemmer, Innertkirchen, et H. Gerber, Zurich

Après une période d'exploitation de deux ans, qui vient de s'écouler, le rendement de la production d'énergie de l'usine d'Innertkirchen a été déterminé très soigneusement. Les résultats sont basés en partie sur les rendements déterminés pour certaines machines lors des essais de réception chez les fabricants et, en partie, sur des mesures qui ne pouvaient être effectuées qu'après le montage des différentes parties de l'installation, notamment sur des mesures hydrauliques détaillées.

Les auteurs de ce rapport ont tenu compte des pertes hydrauliques entre le canal de fuite de Handeck et les entrées aux turbines d'Innertkirchen, ainsi que des pertes dans les turbines, dans les alternateurs (y compris les pertes dans les excitatrices et les paliers), dans les lignes à 13,5 kV reliant les alternateurs aux transformateurs et dans les câbles à 150 kV reliant les transformateurs de l'usine souterraine et le poste en plein air d'Innertkirchen.

Ils relèvent la nécessité d'un contrôle permanent du rendement, celui-ci diminuant peu à peu en raison des modifications que subissent les installations hydrauliques au cours de l'exploitation. La figure 14, qui indique la modification progressive du rendement, est très instructive à cet égard; il en est de même de l'article de M. F. Aemmer sur l'effet de l'usure des pointeaux et des tuyères sur le rendement des turbines Pelton (Bull. ASE 1943, No. 13).

L'usine hydroélectrique d'Innertkirchen de la S. A. des Forces Motrices de l'Oberhasli (FMO) est depuis deux ans en service et a produit plus de 735 millions de kWh, appoint considérable, dont a bénéficié notre économie publique. Il est donc intéressant d'étudier le rendement de cette importante installation de conception très moderne et d'analyser les pertes d'énergie qui affectent ses différentes parties. Nous admettons que les données techniques de l'usine d'Innertkirchen sont bien connues, puisqu'elles ont déjà fait l'objet de nombreuses publications¹⁾, et que nous pouvons nous borner aux indications et aux données qui intéressent plus particulièrement les objets en relation directe avec la matière que nous nous proposons de traiter.

¹⁾ A. Kaech, H. Juillard, F. Aemmer: Das Kraftwerk Innertkirchen, die zweite Stufe der Oberhasliwerke. Schweiz. Bauztg. vol. 120(1942), Nos. 3 à 6.

J. Calame: L'usine d'Innertkirchen des Forces Motrices de l'Oberhasli. Bull. techn. Suisse rom. 1942, Nos. 23 et 24.

Der zweite Ausbau der Oberhasli-Kraftwerke. Bull. ASE 1942, No. 20.

A. Kleiner: Besuch bei den Kraftwerken Oberhasli. Bull. ASE 1943, No. 10.

H. Ludwig: Die Hilfsanlagen des unterirdischen Kraftwerkes Innertkirchen. Bull. ASE 1943, No. 17.

In der nunmehr abgelaufenen zweijährigen Betriebsperiode des Kraftwerkes Innertkirchen wurden eingehende Untersuchungen zur Bestimmung des Wirkungsgrades der Energieerzeugung angestellt. Die Resultate stützen sich teils auf Wirkungsgradbestimmungen einzelner Maschinen bei den Abnahmeversuchen in den Werkstätten der Fabrikanten, teils auf Messungen, die nur durch das Zusammenwirken bestimmter Anlagenteile möglich wurden, besonders auf die sorgfältigen Wassermessungen.

Bei den vorliegenden Betrachtungen werden die hydraulischen Verluste vom Ablaufkanal Handeck bis zu den Einläufen der Turbinen Innertkirchen, die Verluste in Turbinen, Generatoren (einschliesslich Erreger- und Spurlagerverluste), in den 13,5-kV-Leitungen von den Generatoren zu den Transformatoren und in den 150-kV-Kabeln zwischen den Transformatoren im unterirdischen Kraftwerk und der Freiluftstation Innertkirchen berücksichtigt.

Die Autoren betonen die Notwendigkeit der betriebsmässigen Ueberwachung des Wirkungsgrades, da dieser durch die Veränderungen, die die hydraulischen Anlagen im Betriebe erleiden, beeinflusst wird. Sehr instruktiv wirkt Fig. 14, die die zeitliche Aenderung des Wirkungsgrades zeigt, sowie der Aufsatz von F. Aemmer: Ueber den Einfluss der Abnutzung von Nadeln und Düsen auf den Wirkungsgrad von Pelton-Turbinen (Bull. SEV 1943, Nr. 13).

(Traduction.)

L'usine hydroélectrique d'Innertkirchen (fig. 1) constitue le palier inférieur du groupe d'usines Handeck-Innertkirchen avec ses bassins d'accumulation du Grimsel et du Gelmer. Elle utilise l'eau qui s'écoule des turbines de l'usine de la Handeck et celle du bassin versant intermédiaire, situé en aval des barrages du Grimsel et du Gelmer, jusqu'à la Handeck. Du canal de fuite des turbines de la Handeck, dont le niveau libre est à la cote 1302,24 n. h., l'eau est amenée par une galerie de 10 km à la chambre d'équilibre de l'usine d'Innertkirchen, d'où elle arrive par une conduite forcée de 1,8 km à un collecteur et ensuite aux turbines. Les injecteurs des turbines sont à la cote 629,44 n. h. La chute totale utilisée entre le canal de fuite des turbines de la Handeck et les injecteurs des turbines d'Innertkirchen est donc de 672,8 m.

L'usine d'Innertkirchen est actuellement équipée de 3 groupes générateurs, comportant chacun une turbine Pelton verticale de 43 000 kW à deux injecteurs, surmontée d'un alternateur triphasé de 47 500 kVA sous tension composée de 13,5 kV (fig. 2). Chaque alternateur alimente, par une ligne nue d'environ 30 m, un transformateur d'une puissance nominale de 47 500 kVA, qui relève la ten-

sion à 150 kV, sous laquelle l'énergie est amenée aux barres omnibus du poste de distribution en plein air d'Innertkirchen, par des câbles dont la longueur est de 323 à 420 m selon l'emplacement des transformateurs. Dans le poste en plein air,

avons tenu compte de toutes les pertes qui se présentent entre le canal de fuite de l'usine de la Handeck et la fourniture de l'énergie aux barres omnibus à 150 kV du poste en plein air d'Innertkirchen, c'est-à-dire:

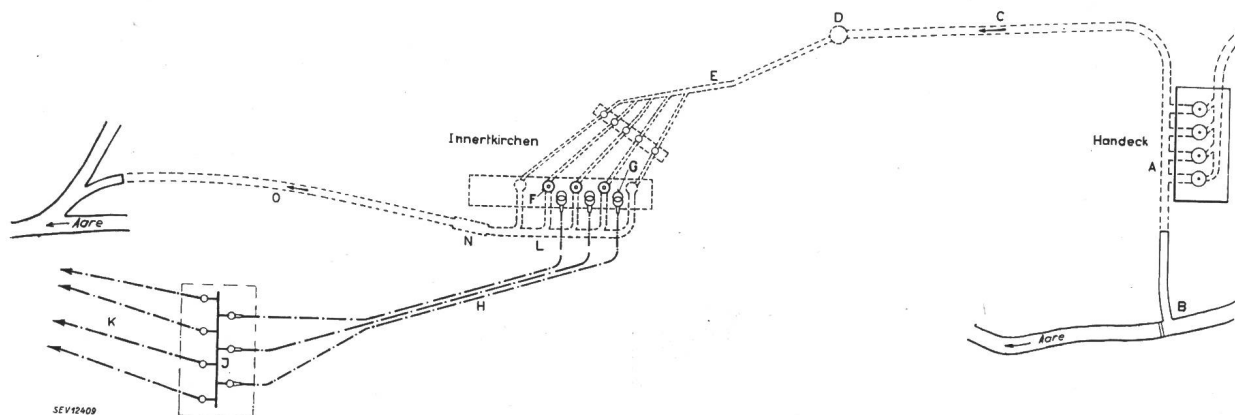


Fig. 1.

Représentation schématique des installations des usines de l'Oberhasli

- | | |
|--|--|
| A Canal de fuite des turbines de la Handeck. | H Câbles à 150 kV. |
| B Prise d'eau additionnelle. | J Barres omnibus à 150 kV du poste de distribution en plein air. |
| C Galerie d'amenée à l'usine d'Innertkirchen. | K Feeders à 150 kV. |
| D Chambre d'équilibre de l'usine d'Innertkirchen. | L Galerie de fuite des turbines d'Innertkirchen. |
| E Conduite forcée, collecteur et conduites d'alimentation. | N Chambre de mesures. |
| F Groupes de machines de 48 000 kW. | O Canal de fuite. |
| G Transformateurs de 47,5 MVA, 13,5/150 kV. | |

l'énergie de l'usine d'Innertkirchen est réunie à celle de l'usine de la Handeck, puis transportée aux centres de consommation sous une tension de 150 kV.

Lors des essais de réception, on a constaté que la puissance maximum disponible des turbines dépasse de 13,5 % la puissance nominale de 43 000 kW (58 400 ch) et atteint 48 800 kW pour une chute de 670 m. Etant donné que les canalisations d'amenée et de sortie d'eau sont, elles aussi, largement dimensionnées et que les alternateurs et les transformateurs avec leurs lignes de liaison et les câbles à 150 kV sont également capables de supporter une puissance plus élevée sans dépasser les températures admissibles, la capacité de production accrue des turbines peut être utilisée pratiquement sans limitation. Grâce à un ample dimensionnement des turbines, des alternateurs, des transformateurs et des lignes, la puissance de l'usine d'Innertkirchen est ainsi sensiblement plus grande que la puissance prévue dans le projet. Mesurée aux barres omnibus à 150 kV, la puissance disponible atteint 46 MW lorsqu'un seul groupe est en service, 91 MW lorsque deux groupes sont simultanément en service et 130 MW lorsque les trois groupes fonctionnent. La diminution de la puissance disponible par groupe quand la charge totale augmente provient du fait que, dans ce cas, la pression de service des turbines baisse légèrement par augmentation de la perte de pression dans la conduite d'amenée de l'eau.

En ce qui concerne le rendement de la production d'énergie de l'usine d'Innertkirchen, nous

- A. les pertes hydrauliques entre le canal de fuite de l'usine de la Handeck et les entrées des turbines d'Innertkirchen;
- B. les pertes dans les turbines;
- C. les pertes dans les alternateurs, y compris les pertes dans les excitatrices et les paliers;
- D. les pertes dans les lignes à 13,5 kV reliant les alternateurs aux transformateurs;
- E. les pertes dans les transformateurs;
- F. les pertes dans les câbles à 150 kV reliant les transformateurs au poste en plein air d'Innertkirchen.

En raison de la grande puissance nécessaire à la charge du réseau de transport à 150 kV, l'usine d'Innertkirchen travaille avec un facteur de puissance qui ne s'écarte que très peu de l'unité, parfois en avance et parfois en retard. Dans ce qui suit, nous admettrons donc le facteur de puissance $\cos \varphi = 1$.

Etant donné l'importance et la grande puissance de l'usine d'Innertkirchen (130 MW), les essais de réception de toutes les parties de l'installation ont été exécutés avec le plus grand soin. Alors que les pertes dans les alternateurs et les transformateurs purent être parfaitement déterminées au cours des essais de réception dans les ateliers des fournisseurs, c'est-à-dire avant la mise en service de l'usine, la détermination des pertes hydrauliques dans la conduite d'amenée de l'eau et celle du rendement des turbines ne pouvaient naturellement avoir lieu qu'après la mise en service de l'usine. Pour les liaisons à 13,5 kV et les câbles à 150 kV, on a renoncé à mesurer les pertes, car celles-ci sont insignifi-

fiantes par rapport à l'ensemble des pertes et peuvent d'ailleurs être facilement calculées. En ce qui concerne la détermination du rendement des turbines, et par conséquent des pertes dans celles-ci, la mesure de la consommation d'eau est, parmi toutes les mesures nécessaires à la détermination

a une longueur de 9953,6 m et un profil circulaire de 3,3 m de diamètre. Il s'agit d'une galerie sous pression, avec pente moyenne de 4,9 ‰.

Sur toute sa longueur, cette galerie est en partie bétonnée et en partie garnie de tuyaux en tôle. La face intérieure est particulièrement lisse, afin que les pertes de chute demeurent aussi faibles que possible. Cette galerie peut assurer l'écoulement de 40 m³/s, mais les débits actuels ne dépassent pas 24 m³/s pour les trois groupes installés dans l'usine d'Innertkirchen.

La conduite forcée, qui relie la chambre d'équilibre à l'installation des machines d'Innertkirchen, comporte deux tronçons. Le tronçon supérieur, d'une longueur de 995 m, présente une pente de 60 ‰, tandis que le tronçon inférieur a 810 m de long et une pente de 12 ‰. Le diamètre intérieur des tuyaux en tôle dont cette conduite est garnie atteint 2,6 m en haut et 2,4 m en bas.

Le collecteur est entièrement bétonné dans le rocher, comme c'est d'ailleurs le cas de la conduite forcée. Son diamètre intérieur, de 2,4 m au début, se réduit successivement à chaque dérivation, pour atteindre finalement 1,55 m à la turbine 5. Les conduites d'alimentation amenant l'eau aux différentes turbines ont un diamètre intérieur de 1,1 et 1,2 m.

La perte de pression dans la canalisation d'amenée de l'eau entre le canal de fuite de l'usine de la Handeck et les ouvrages d'entrée des turbines d'Innertkirchen a été mesurée pour différents débits, à l'aide d'un manomètre de précision monté sur une entrée de turbine à Innertkirchen. La chute de pression de toute la canalisation d'amenée de l'eau, d'après laquelle on a pu calculer la perte de pression en tenant compte des différentes vitesses correspondantes, a été déterminée en observant les indications du manomètre lorsque l'usine était arrêtée et aux différents débits d'eau. Ces derniers

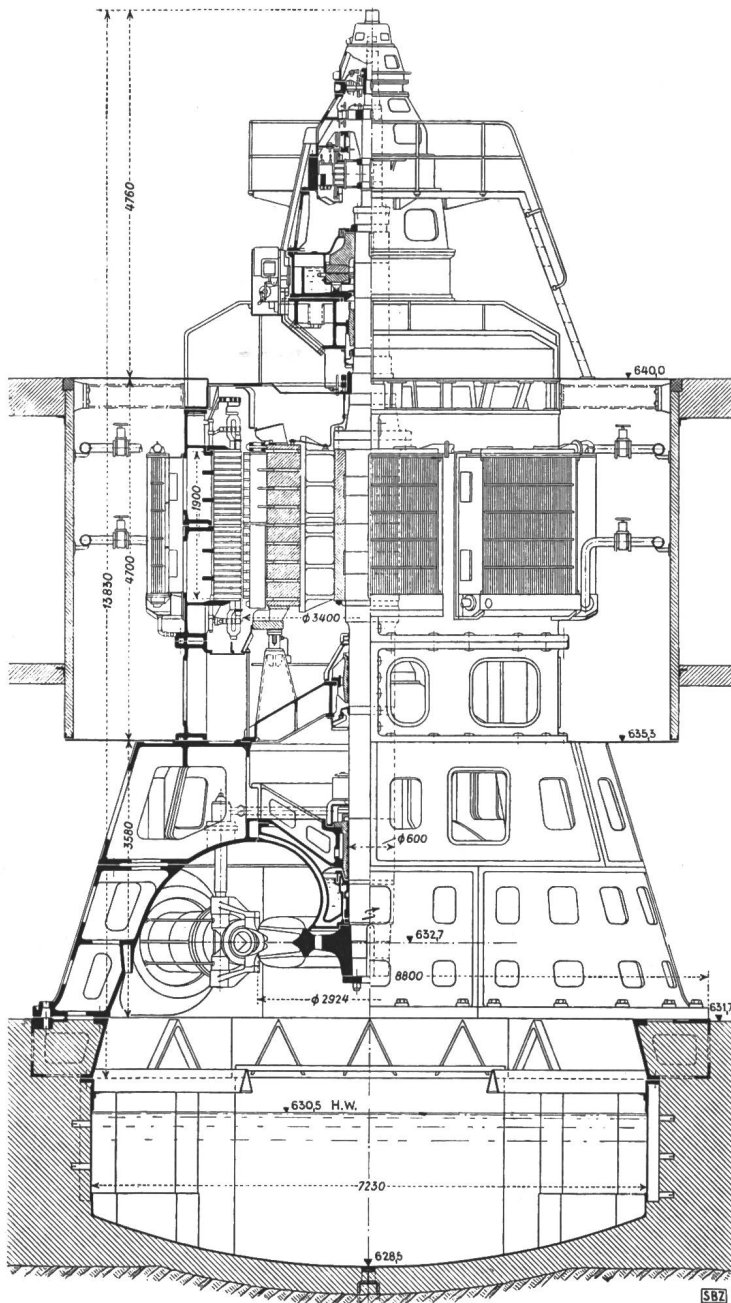


Fig. 2.
Groupe de machines de 48 000 kW
1 : 100

du rendement, celle qui pose le plus d'exigences et présente de ce fait le plus grand intérêt. Nous décrirons donc les différentes méthodes qui furent appliquées aux mesures hydrauliques et étudierons les résultats obtenus.

A. Galerie d'amenée, conduite forcée et collecteur

La galerie d'amenée entre l'usine de la Handeck et la chambre d'équilibre de l'usine d'Innertkirchen

furent mesurés à l'aide de venturimètres et des débitmètres qui leur étaient raccordés et qui avaient

Pertes de pression Handeck-Innertkirchen

Tableau I

Débit d'eau m ³ /s	Perte de pression m	Perte de pression en pourcents de la chute brute
6	2,5	0,37
12	7,0	1,04
18	14,7	1,18
24	25,0	3,72

été étalonnés lors de la détermination du rendement des turbines. Les résultats de la détermination de la perte de pression sont relevés sur le tableau I.

B. Turbines

Les caractéristiques des turbines sont les suivantes:

Type: Turbine Pelton à axe vertical, à deux injecteurs.
Puissance nominale: 43 000 kW sous une chute de 670 m,
36 400 kW sous une chute de 600 m.
Vitesse de rotation: 428,6 t/min.

Les essais de réception des turbines se firent de telle sorte que le groupe de machines à mesurer fonctionnait sous la charge voulue, l'énergie produite étant débitée sur le réseau à 150 kV, comme en service normal. Pour éviter toute variation de la charge, le régulateur de la turbine fut bloqué et les pointeaux demeurèrent dans la même position, de sorte que le débit était maintenu à la valeur désirée.

Les mesures du débit et de la chute furent exécutées en commun par le personnel de la S. A. Escher Wyss et celui des FMO, tandis que les Institutions de Contrôle de l'ASE étaient chargées de déterminer la puissance fournie par l'alternateur.

1° Détermination du débit d'eau

Les préparatifs en vue des mesures hydrauliques pouvaient être basés sur les expériences faites à

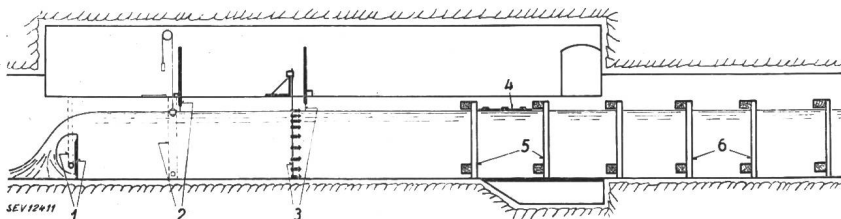


Fig. 3.

Croquis général du dispositif d'essais de la chambre de mesures de l'usine d'Innertkirchen

- 1 Déversoir de mesure.
- 2 Echelle hydrométrique à stylet et à flotteur.
- 3 Section de mesure par moulinets.
- 4 Radeau amortisseur.
- 5 Grilles fines.
- 6 Grilles grossières.

l'usine de la Handeck, où des mesures comparatives détaillées avaient été exécutées précédemment²⁾. Vu l'importance et la puissance de l'usine d'Innertkirchen, les dispositions nécessaires avaient déjà été prises lors de l'établissement du projet de cette usine, afin de permettre une exécution parfaite des mesures hydrauliques.

La principale méthode prévue était celle de la mesure aux moulinets hydrométriques. Dans ce but, un certain parcours de la galerie de fuite de l'usine d'Innertkirchen fut aménagé en conséquence et élargi de manière à constituer une chambre de mesures commodément accessible, où l'on pouvait procéder non seulement aux mesures par moulinets, mais aussi à des mesures par déversoir (figures 1 et 3), ce dernier devant être étalonné lors des mesures aux moulinets.

En outre, chaque tuyau d'amenée d'eau à une turbine est équipé d'un venturimètre auquel sont

²⁾ W. Dietrich: Wassermessungen mit Ueberfall in der Zentrale Handeck der Kraftwerke Oberhasli A.-G. Schweiz. Bauztg. vol. 99(1932), No. 1.

reliés des indicateurs et des compteurs de débit. Ces dispositifs devaient, eux aussi, être étalonnés lors des essais de réception des turbines. Enfin, on avait prévu également une méthode de mesure très précise, qui consistait à utiliser la courbe d'étalonnage des injecteurs de turbines, basée sur de nombreux essais³⁾.

Comme il est peu probable que l'on ait prochainement l'occasion de procéder à nouveau, dans une usine, à des mesures hydrauliques comparatives aussi détaillées à l'aide de méthodes aussi variées, nous nous étendrons quelque peu sur ce sujet.

a) Mesure par moulinets hydrométriques

La disposition générale est celle du croquis de la figure 3. Le profil de mesure des moulinets se trouvait à environ 9 m du déversoir. Les dispositifs d'amortissement, sous forme de grilles grossières et fines et d'un lourd radeau, furent adaptés aux conditions locales.

La mesure par moulinets était combinée de telle sorte au déversoir, que la profondeur d'eau dans le profil de mesure des moulinets dépendait de la hauteur de déversement. Ce système permettait un réglage précis des moulinets sur la tige verticale, de manière qu'à chacun des points de garantie principaux le moulinet supérieur se trouvait aussi près que possible de la surface de l'eau. Pour un profil de mesure d'une largeur de 3,7 m et d'une

profondeur maximum de 2,8 m, les Normes SIA prescrivent au moins 45 et au plus 81 points de mesure. A Innertkirchen, les mesures s'opéraient simultanément par 9 moulinets montés sur une tige verticale, ceci dans 11 positions verticales, de sorte que l'on disposait pour les jaugeages d'un nombre de points de mesure d'environ 25 % plus élevé que celui prescrit par les normes SIA.

Comme ce fut le cas à l'usine de la Handeck, les mesures du débit à Innertkirchen eurent lieu à l'aide de deux types de moulinets. Etant donné que l'on ne disposait pas de moulinets à anneaux, on se servit d'un jeu complet de moulinets Ott à trois aubes à rayons et d'un jeu de moulinets Ott à arêtes obliques. Tous ces moulinets, dont le diamètre est de 12 cm, furent étalonnés, avant les essais, par les soins du Service fédéral des eaux, à Berne, avec le dispositif de fixation prévu.

La mesure de la profondeur de l'eau s'opéra selon deux méthodes: Pour la première, les mou-

³⁾ H. Gerber: Wassermessung in Freistrahlturbinenanlagen. Schweiz. Bauztg. vol. 117(1941), No. 14.

linets furent surmontés de trois échelles hydrométriques à stylet, dont le réglage était contrôlé aussi bien avant qu'après les essais. Pour la seconde méthode, la tige portant les moulinets était soulevée, immédiatement après la mesure dans une verticale, jusqu'à ce que la pointe du moulinet le plus haut affleure exactement la surface de l'eau. A l'aide de la hauteur de levage lue sur la tige et de la répartition connue des moulinets, on pouvait ainsi calculer également la profondeur de l'eau. Les résultats obtenus par ces deux méthodes ne présentèrent que des écarts insignifiants. L'enregistrement des signaux des moulinets, correspondant chaque fois à 10 rotations, s'opérait simul-

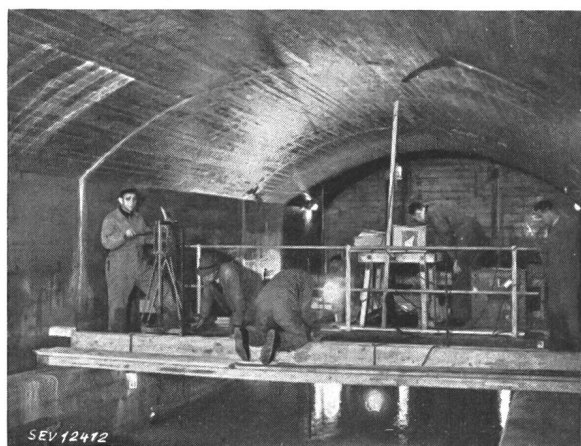


Fig. 4.

Chambre de mesures photographiée pendant l'exécution d'une mesure

tanément pour tous les moulinets avec un chronographe, en même temps que la frappe d'une horloge électrique à secondes.

La figure 4 montre une vue de la chambre de mesures pendant l'exécution d'une mesure avec des moulinets à rayons; on aperçoit, au fond, les trois stylets des échelles hydrométriques du déversoir.

b) Déversoir

Les dimensions du déversoir, construit sous forme d'une vanne coulissante, répondaient exactement aux prescriptions de la SIA, relatives aux déversoirs sans contraction latérale, sauf que la hauteur maximum admissible de 800 mm était sensiblement dépassée à Innertkirchen, puisqu'elle y atteignait 1100 mm. La mesure de la hauteur de déversement s'opéra à l'aide de trois échelles hydrométriques à stylet de précision à vernier, situées à environ 3,6 m en amont du déversoir. Pour le contrôle de l'état stationnaire pendant les mesures, une échelle à flotteur était aménagée dans un puits latéral, de manière à enregistrer en grandeur naturelle les variations de niveau.

c) Venturimètres

Les venturimètres ou jaugeurs Venturi sont construits pour un débit de 8,5 m³/s et une différence de pression de 6 m de colonne d'eau. Alors

que le débit théorique résultant des dimensions est de

$$Q_{théor} = 3,581 \cdot \sqrt{\Delta p}$$

le fournisseur indiquait l'équation d'étalonnage:

$$Q_{eff} = 3,470 \cdot \sqrt{\Delta p}$$

Cela correspond à un coefficient de débit $\mu = 0,969$, valeur qui peut être considérée comme étant extrêmement élevée. La mesure de la différence de pression s'est faite à l'aide d'un manomètre différentiel à mercure.

d) Injecteurs des turbines

Le diagramme du débit des injecteurs des turbines d'Innertkirchen avait déjà été calculé sur la base des données dont on disposait alors, en tenant compte de la chute absolue, et utilisé autrefois pour des mesures faites à titre d'information. L'emploi de la courbe d'étalonnage des injecteurs nécessitait uniquement une mesure précise de la course du pointeau, mesure qui fut effectuée à l'aide d'un pied à coulisse de précision, maintenu exactement en place par un dispositif approprié.

2^e Mesure de la hauteur de chute

La pression disponible à la turbine a été mesurée séparément pour chaque entrée d'injecteur, avec un manomètre de précision à ressort et un mano-

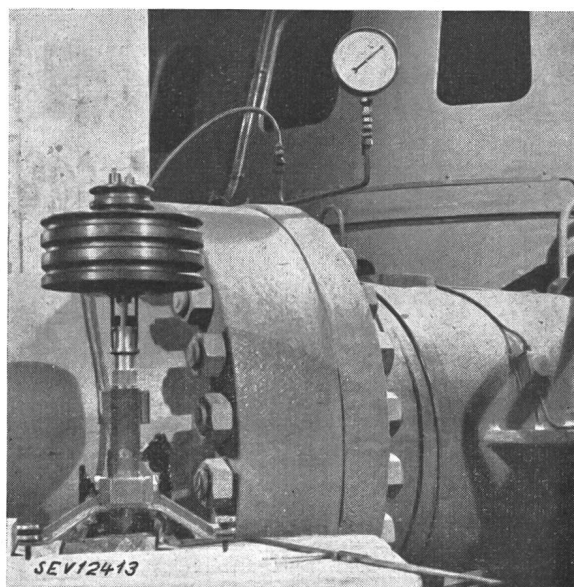


Fig. 5.

Dispositif d'entrée d'eau d'une turbine, avec manomètres à contreponds et à ressort

mètre à contreponds, dont l'extrémité du piston présentant une surface de 1 cm² exactement se trouvait en position moyenne à la hauteur de l'axe du jet. Par la rotation du piston, on pouvait éliminer tout frottement dans le sens vertical. La figure 5 montre le raccordement des manomètres à l'entrée d'une turbine.

3° Mesure de la puissance débitée

La puissance mécanique fournie par la turbine a été calculée en partant de la puissance électrique débitée aux bornes de l'alternateur et en tenant compte du rendement déterminé lors des essais de réception de l'alternateur.

Les mesures électriques furent exécutées par les soins des Institutions de Contrôle de l'ASE. On installa dans ce but les dispositifs d'essais de précision suivants, étalonnés officiellement:

- 1 jeu d'appareils de mesure de précision de l'ASE;
- 1 compteur-étalon de précision de l'ASE, qui fut observé pour chaque point de mesure durant la mesure aux moulinets;
- 1 jeu d'appareils de précision des FMO, pour le contrôle.

Les écarts entre les indications des appareils de précision et du compteur-étalon de l'ASE ne dépassèrent pas 0,2 ‰, ceux des appareils de précision de l'ASE et des FMO 0,16 ‰. La détermination du rendement fut basée sur les mesures wattmétriques de l'ASE.

Les transformateurs d'intensité et de tension normaux de service furent utilisés comme transformateurs de mesure. Appartenant à la classe 0,2 VDE, ils pouvaient donc être considérés comme des transformateurs de précision. Il a d'ailleurs été tenu compte de leurs erreurs en évaluant les résultats des mesures.

4° Exécution des essais, résultats

Immédiatement après la fin d'une mesure hydraulique, les moulinets étaient changés et l'essai

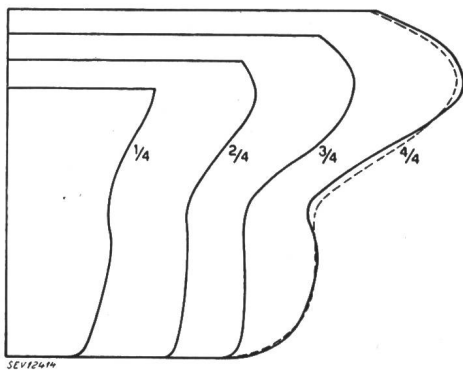


Fig. 6.

Comparison de la répartition des vitesses dans une verticale du centre du canal, sous différentes charges
 — Moulinets à rayons. - - - - - Moulinets à arêtes obliques.

était répété pour le même réglage de la turbine. Une mesure hydraulique demandait en moyenne 25 minutes et le changement des moulinets 13 minutes environ. Il a été procédé, en tout, deux fois à deux séries de mesures, sous 13 charges différentes.

Il est particulièrement intéressant de comparer les résultats obtenus par les différentes méthodes de mesures hydrauliques. Les graphiques ont été établis à l'aide de la nouvelle formule de Rehbock de 1929:

$$Q = \left[1,783 + 0,24 \cdot \frac{h_e}{s} \right] \cdot B \cdot h_e^{3/2}$$

Connaissant la hauteur de déversement h , on a

$$h_e = h + 1,1 \text{ en mm}$$

En réduisant cette formule par $B \cdot h_e^{3/2}$, la forme simplifiée de l'équation s'exprime par la droite

$$y = a + b \cdot x$$

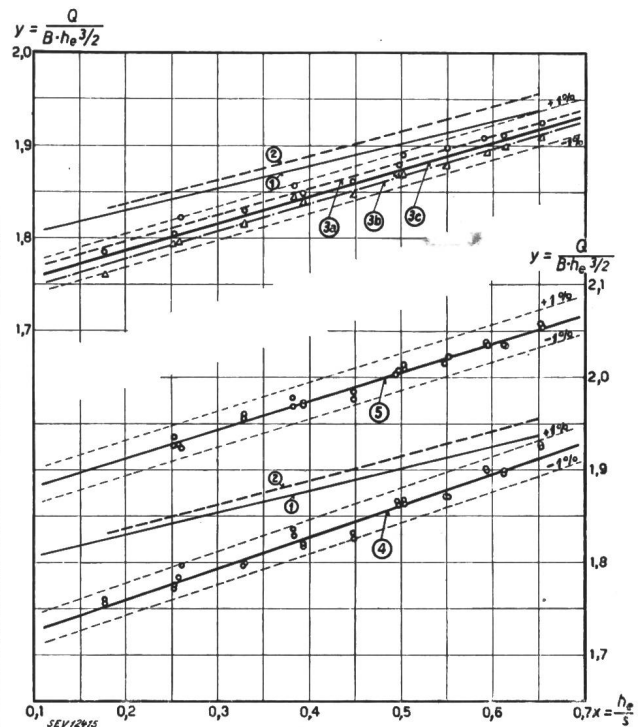


Fig. 7.

Résultats des différentes méthodes de mesures hydrauliques
 (Dispersion des points d'essais)

- 1 Déversement Rehbock 1929.
- 2 Déversement SIA 1924.
- 3a Moulinets à rayons.
- 3b Moulinets à arêtes obliques.
- 3c Droite Q moyenne.
- 4 Injecteur de la turbine.
- 5 Venturimètre.

Sur la figure 7, les résultats des différentes méthodes de mesures hydrauliques sont comparés avec les débits calculés à l'aide des formules de Rehbock 1929 et de la SIA 1924. On constatera ce qui suit: Les deux systèmes de moulinets présentent, dans le domaine des garanties prévues pour Inmertkirchen, des écarts de 0,6 à 0,8 ‰. Les mesures ayant été effectuées d'une manière identique et les moulinets ayant été étalonnés par la même station d'essai, juste avant les essais, ces écarts ne s'expliquent que par le fait que les deux types de moulinets réagissent différemment à la turbulence de l'eau. Pour un même système de moulinets, la dispersion des points de mesure est extrêmement faible, de sorte que l'on peut simplement faire passer la droite moyenne par ces points, si l'on adopte la méthode des moindres carrés. Les deux systèmes de moulinets étant de valeur équivalente, on a adopté pour le calcul du rendement des turbines la moyenne des deux débits constatés à l'aide de ces deux systèmes.

Les mesures avec l'injecteur de la turbine et avec le venturimètre ne présentent, elles aussi, que de faibles dispersions.

Sur la figure 8, les différentes méthodes de mesures hydrauliques, c'est-à-dire les droites tirées par les points de mesure, sont comparées entre elles. Dans le domaine des garanties prévues pour Innertkirchen, les deux formules de Rehbock et de la SIA présentent déjà de petits écarts. La droite moyenne de la mesure aux moulinets est, en général, de 1,5 à 2,5 % inférieure au débit moyen mesuré au déversoir. La concordance des résultats n'est donc pas particulièrement bonne.

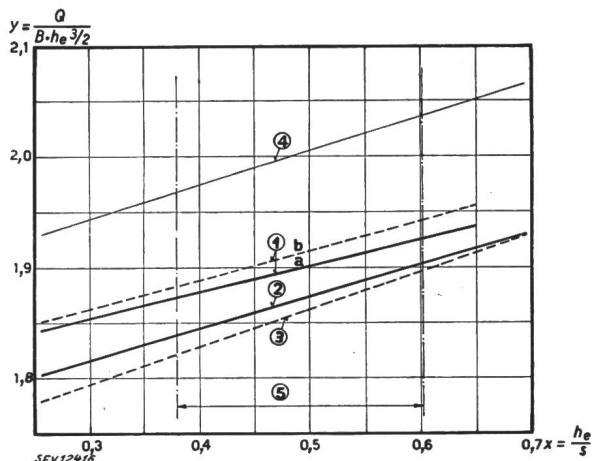


Fig. 8.

Comparaison des droites de compensation moyennes des différentes méthodes de mesures hydrauliques

- 1a Déversement Rehbock 1929.
- 1b Déversement SIA 1924.
- 2 Droite moyenne des moulinets.
- 3 Injecteur de la turbine.
- 4 Venturimètre.
- 5 Domaine de garantie.

Par contre, l'écart entre les mesures hydrauliques à l'aide des moulinets et à l'aide de l'injecteur de la turbine est plutôt plus petit que l'écart entre les deux formules de déversement. Cela prouve à

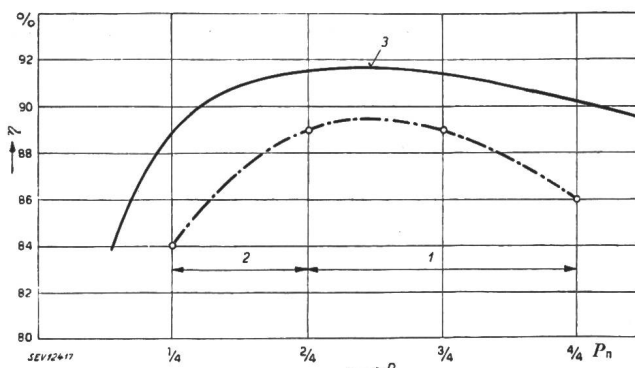


Fig. 9.

Rendement des turbines

pour $n = 428,6$ t/min et $H = 670$ m de chute.
 1 Garantie. 2 Information. 3 Essais.
 $P_n = 43\ 000$ kW (58 400 PS).

nouveau que les injecteurs des turbines permettent d'effectuer des mesures hydrauliques convenables, du moins tant qu'ils sont neufs.

Les débits du venturimètre calculés d'après le coefficient de débit indiqué par le fournisseur de cet appareil sont en moyenne de 7 % trop élevés. Le coefficient μ doit donc être en réalité d'environ 0,9, ce qui correspondrait aux résultats obtenus avec d'autres venturimètres.

La figure 9 indique les résultats des mesures en tenant compte des débits moyens des moulinets, comparativement à la garantie indiquée à l'époque de la commande. On constatera que le sommet de la courbe atteint 91,7 % et que la courbe dépasse la valeur de 90 % depuis la pleine charge garantie jusqu'à 30 % de cette charge. Ramenée à la chute garantie de 670 m, la puissance maximum est de 48 800 kW, dépassant ainsi d'environ 13,5 % la puissance garantie de 43 000 kW.

Ces résultats ont été obtenus avec un groupe de machines qui avait déjà été en service régulier pendant près de 2700 heures, au moment des mesures, et avait fourni jusqu'alors plus de 70 millions de kWh.

C. Alternateurs

Les trois alternateurs triphasés installés actuellement dans l'usine d'Innertkirchen présentent les caractéristiques suivantes:

Puissance nominale sous tension nominale	47 500 kVA sous $\cos \varphi$ 0,7
Puissance maximum (sous une tension de 10 % plus élevée)	52 250 kVA sous $\cos \varphi$ 0,7
Tension nominale	13 500 V
Intensité nominale	2 030 A
Vitesse de rotation	428,6 t/min

Les essais de réception furent exécutés en fabrique par les soins des Institutions de Contrôle de l'ASE, selon la méthode de la mesure des pertes individuelles, conformément aux règles REM du VDE. Les résultats sont consignés au tableau ci-après:

Tableau II

	10300	20600	30900	41200	48600	kW
Puiss. de la turbine	10300	20600	30900	41200	48600	kW
Puissance de l'alternateur à $\cos \varphi = 1$	9630	20000	30200	40300	47600	kW
Pertes p. frottement et ventilation	410	410	410	410	410	kW
Pertes dans le fer (13,5 kV)	200	200	200	200	200	kW
Pertes dans le cuivre (stator)	12	54	118	204	285	kW
Pertes d'excitation et additionnelles	48	56	72	86	105	kW
Total des pertes	670	720	800	900	1000	kW
Rendement	93,5	97,1	97,5	97,8	98,0	%

D. Lignes reliant les alternateurs aux transformateurs

Les lignes reliant les alternateurs aux transformateurs sont constituées par trois barres d'aluminium par pôle, présentant chacune une section de 80×8 mm, soit au total 1920 mm², et une longueur d'environ 30 m chacune.

Pour une perte par effet Joule de 71,5 W/m, la perte atteint au total 6,5 kW par groupe de machines, à la charge maximum de 47 500 kVA sous 13,5 kV.

E. Transformateurs

Les trois transformateurs installés jusqu'ici présentent les caractéristiques suivantes:

Puissance nominale	47 500 kVA
Puissance maximum (sous tension primaire de 10 % plus élevée)	52 250 kVA
Rapport de transformation à vide } 12 900/13 500/14 100/14 700/15 300 V	160 000
Intensité nominale	2030/172 A

Les essais de réception furent exécutés en fabrique, par les soins des Institutions de Contrôle de l'ASE, selon les règles RET du VDE. Ramenés au rapport de transformation 13 500/160 000 V, les résultats atteints furent les suivants:

Tableau III

Puiss. de la turbine	10300	20600	30900	41200	48600	Wk
Puiss. du transformateur à $\cos \varphi = 1$	9630	20000	30200	40300	47600	kW
Pertes dans le fer	80	80	80	80	80	kW
Pertes dans le cuivre	9	45	103	184	257	kW
Total des pertes	89	125	183	264	337	kW
Rendement	99,08	99,38	99,4	99,35	99,29	%

F. Câbles à haute tension

reliant les transformateurs au poste de distribution en plein air

Cette liaison par câbles est dimensionnée pour une tension de transport de 150 000 V et comporte un câble d'une section de cuivre de 150 mm² par pôle. Les longueurs des câbles sont les suivantes:

Groupe de machines 1	420 m
Groupe de machines 2	345 m
Groupe de machines 3	323 m

Pour une résistance effective moyenne, en courant alternatif, de 0,163 ohm par pôle et km, les pertes, y compris pertes diélectriques, atteignent environ 6,5 kW pour le groupe médian, à la charge maximum de 47 500 kVA.

G. Le rendement global

Le rendement global de la production d'énergie de l'usine d'Innertkirchen est reproduit sur la figure 10, en fonction de la puissance débitée,

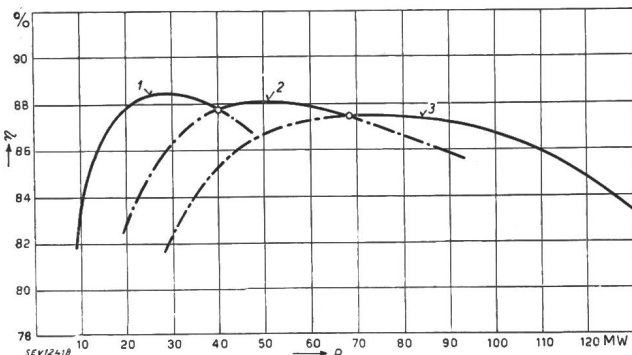


Fig 10.

Rendement global de l'usine d'Innertkirchen, constaté entre la prise d'eau du canal de fuite de l'usine de la Handeck et la fourniture d'énergie électrique sous tension de 150 kV
1, 2, 3 Nombre des groupes de machines en service.

pour un facteur de puissance $\cos \varphi = 1$. On constate que la valeur maximum du rendement est de 88,4 % à une charge de 25 à 30 MW. Le rendement diminue lentement quand la charge augmente, mais il dépasse néanmoins 83 % à la charge maximum de 130 MW actuellement disponible à l'usine d'Innertkirchen. Aux charges inférieures à 15 ou 20 MW, le rendement diminue rapidement. Il atteint encore 85 % à 12 MW, soit au 25 % de la puissance maximum d'un groupe, et 82 % à 8 MW, soit au 16 % de la puissance maximum d'un groupe. En pratique, des charges inférieures à 8 MW sont improbables et peuvent d'ailleurs être facilement évitées par des mesures d'organisation appropriées, en répartissant la charge sur les différentes usines travaillant en parallèle, lorsqu'il s'agit de réseaux interconnectés.

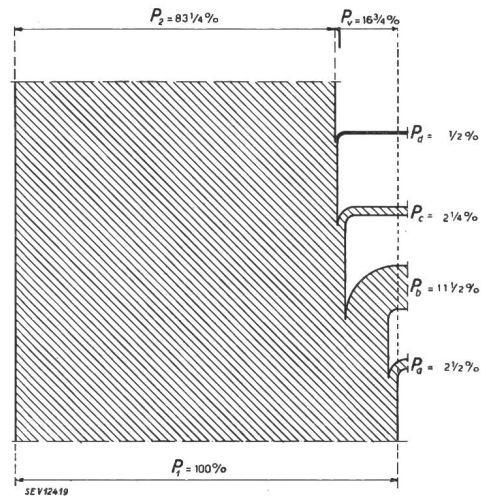


Fig. 11.

Bilan de l'énergie de l'usine d'Innertkirchen pour une puissance utile de 130 MW, entre la prise d'eau du canal de fuite de l'usine de la Handeck et la fourniture d'énergie électrique sous tension de 150 kV

Répartition des pertes:

- P_1 Puissance reçue.
- P_2 Puissance débitée.
- P_v Pertes.
- P_a Amenée de l'eau.
- P_b Turbines.
- P_c Alternateurs, y compris paliers.
- P_d Transformateurs et lignes électriques.

Le bilan de l'énergie est reproduit sur la figure 11, pour l'aménagement actuel de l'usine, soit pour une charge maximum de 130 MW.

La courbe du rendement (fig. 10) est relevée pour une fourniture d'énergie avec un facteur de puissance égal à l'unité, ce qui correspond aux conditions réelles d'exploitation de l'usine d'Innertkirchen. Dès que le facteur de puissance s'écarte de l'unité, il en résulte une diminution du rendement, qui atteint par exemple en moyenne 0,6 % pour un facteur de puissance $\cos \varphi = 0,8$ en arrière, sur toute l'étendue de la charge.

La courbe du rendement de la figure 10 prouve également qu'il est plus économique d'utiliser deux machines au lieu d'une pour les charges comprises

entre 40 et 46 MW, à condition que la charge soit régulièrement répartie entre les deux machines. Il en est de même pour le passage de 2 à 3 machines, aux charges comprises entre 68 et 91 MW. *Ce croisement des courbes de rendement lors de l'exploitation avec 1, 2 ou 3 machines montre que, pour atteindre le rendement maximum de l'usine, à mesure que la charge totale augmente, il est chaque fois nécessaire de mettre en service un nouveau groupe avant même que la puissance des autres machines en service soit complètement utilisée.* Cela permet d'autre part de disposer en tout temps d'une certaine puissance de réserve dans des machines déjà en rotation, ainsi que l'exige une exploitation correcte, afin de pouvoir immédiatement mettre en jeu une puissance supplémentaire, par exemple en cas d'arrêt inopiné d'autres usines travaillant en parallèle. Cette exigence est particulièrement importante pour une usine à accumulation, comme celle d'Innertkirchen.

Le rendement de la production d'énergie de l'usine d'Innertkirchen peut être considéré comme extrêmement favorable, aussi bien en valeur absolue qu'en fonction de la charge totale de l'usine. Bien que les mesures aient été effectuées sur un groupe qui avait déjà fonctionné pendant 2700 heures, les valeurs mesurées dépassaient néanmoins les valeurs ayant servi de base au projet de cette usine. La capacité de production de l'usine d'Innertkirchen est donc sensiblement plus élevée que ne le prévoyait le projet. Ce résultat provient d'une part du fait que les organes de conduite d'eau ont été largement dimensionnés et soigneusement exécutés, surtout la galerie d'amenée, la chambre d'équilibre et le collecteur, d'autre part du fait que le projet des turbines fut très étudié, en corrélation avec des essais détaillés sur modèle réduit. En fixant le nombre de tours des turbines, on avait évité avec grand soin d'arriver dans le domaine où une économie de poids n'aurait été possible qu'au détriment du rendement et de la résistance à la corrosion des aubes des turbines. Enfin, les constructeurs des alternateurs et des transformateurs ont également contribué, pour leur part, à ce remarquable résultat, en atteignant des rendements qui auraient été jugés impossibles quelques années auparavant.

H. Le contrôle permanent du rendement

Les rendements indiqués sont basés sur des mesures de pertes effectuées dans des parties d'installations neuves ou du moins en état pratiquement neuf. Dans le cas des alternateurs, transformateurs et lignes de liaison, il n'est guère probable que les pertes augmentent sensiblement avec le temps. Par contre, il en va différemment pour la galerie d'amenée, la chambre d'équilibre et surtout les turbines. Les organes conduisant l'eau risquent en effet de subir peu à peu des modifications par suite

d'une augmentation de rugosité de la surface bétonnée de la galerie, de rouille des tuyaux de la galerie et de la conduite forcée, ainsi que par des phénomènes de corrosion et de cavitation affectant les surfaces en contact avec l'eau, qui risquent d'augmenter les pertes d'une façon non négligeable. Les turbines sont particulièrement soumises à ces effets, en raison de la grande vitesse de l'eau dans ces machines, de sorte qu'il en résulte une sensible augmentation des pertes après quelques milliers d'heures de service⁴⁾. Enfin, des pertes supplémentaires peuvent être provoquées par les alluvions et par des pièces de bois ou autres qui viennent se coincer dans les ouvrages d'entrée des turbines, troublant ainsi la formation des jets.

Pour ces motifs, il est désirable que le rendement de la production d'énergie ne soit pas seulement mesuré lors des essais de réception, mais aussi contrôlé en permanence durant l'exploitation. A l'aide d'appareils enregistreurs, on relèvera la quantité d'énergie débitée par chaque alternateur, ainsi que la quantité d'eau utilisée par chaque turbine. Dans la règle, il ne sera pas nécessaire de considérer la chute brute, celle-ci ne variant pratiquement pas.

Il est maintenant facile de mesurer l'énergie électrique à l'aide de transformateurs de mesure

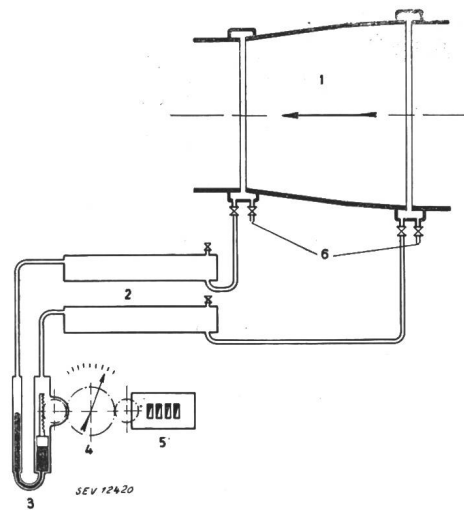


Fig. 12.

Représentation schématique du dispositif de mesure par venturimètre

- 1 Venturimètre.
- 2 Décanteur.
- 3 Manomètre différentiel à mercure.
- 4 Débitmètre (m³/s).
- 5 Compteur d'eau (m³).
- 6 Raccordements pour le manomètre différentiel de contrôle.

et de compteurs de précision, c'est-à-dire avec un appareillage relativement simple. Si les compteurs sont réétalonnés régulièrement, les erreurs des me-

⁴⁾ F. Aemmer: Ueber den Einfluss der Abnutzung von Nadeln und Düsen auf den Wirkungsgrad von Pelton-Turbinen. Bull. ASE 1943, No. 13.

sures électriques peuvent être maintenues à moins de 0,5 %.

En revanche, la détermination du débit utilisé par chaque turbine est passablement plus compliquée durant l'exploitation. C'est pour permettre des mesures hydrauliques qu'ont été montés, dans les chambres des robinets-vannes de l'usine d'Innertkirchen, des venturimètres dans les conduites d'alimentation des turbines, pour une différence de pression de 6 m d'eau sous un débit de 8,5 m³/s. L'enregistrement des débits s'opère mécaniquement par des compteurs reliés aux venturimètres. La construction schématique de ces dispositifs est indiquée sur la figure 12, tandis que la figure 13 donne une vue d'ensemble de cette installation. L'étalonnage des venturimètres eut lieu comme indiqué plus haut, à l'aide de mesures aux moulinets, lors des essais de réception des turbines. La constante d'étalonnage dépend uniquement de la

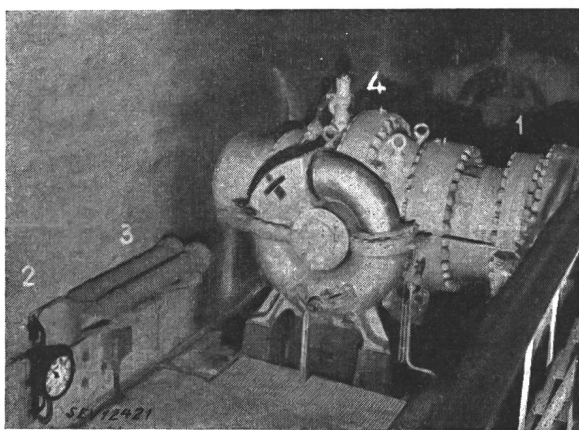


Fig. 13.

Dispositif de mesure par venturimètre dans la chambre des robinets-vannes de l'usine d'Innertkirchen

- 1 Venturimètre.
- 2 Débitmètre et compteur.
- 3 Décanteur.
- 4 Vanne sphérique, servant de diffuseur au venturimètre.

forme géométrique des venturimètres. Elle ne peut donc pas se modifier avec le temps, à condition toutefois que les parois des tuyaux ne puissent pas se rouiller et que, lors du démontage et du remontage de ceux-ci, les brides soient toujours remises exactement en place. Les débitmètres comportent, en revanche, un grand nombre de parties mécaniques et doivent par conséquent, comme les compteurs électriques, être périodiquement réétalonnés, si l'on veut qu'ils fournissent des indications très précises. Ces réétalonnages peuvent se faire facilement sur place, en comparant l'enregistrement des débitmètres au débit d'eau calculé à l'aide de la constante d'étalonnage connue du venturimètre, la différence de pression de ce dernier étant déterminée avec un manomètre différentiel à mercure. Pendant cette mesure, la turbine sera maintenue sous la charge voulue.

Il va de soi qu'en raison des conditions physiques, la précision de la mesure hydraulique par venturimètre et débitmètre n'atteint pas celle de la mesure de l'énergie électrique débitée par les alternateurs. L'essai de contrôle décrit ci-après prouve néanmoins que cette précision est tout de même remarquable.

Du 5 au 31 juillet 1944, on avait renoncé à utiliser de l'eau d'appoint près de la Handeck, de sorte que le débit était exactement le même à Innertkirchen qu'à la Handeck, ce qui se comprend aisément si l'on considère la figure 1. Les turbines de l'usine de la Handeck étant équipées, comme celles d'Innertkirchen, de venturimètres et de débitmètres, on avait en conséquence la possibilité de comparer entre eux les enregistrements de ces différents appareils. L'étalonnage des venturimètres de la Handeck avait été exécuté en 1931, à l'aide de moulinets, lors des essais de réception des turbines de la Handeck, de sorte qu'il s'était écoulé une douzaine d'années entre les étalonnages des venturimètres de la Handeck et de ceux d'Innertkirchen. Quant aux

Enregistrements des débitmètres des usines de la Handeck et d'Innertkirchen, relevés du 5 au 31 juillet 1944

Durant cette période, les deux dispositifs de mesure étaient parcourus par le même débit d'eau.

Tableau IV

Date Juillet 1944	Dispositif de mesure à la Handeck 1000 m ³	Dispositif de mesure à Innertkirchen 1000 m ³	Différence	
			1000 m ³	Pourcents
5.	675,9	675,9	—	—
6.	589,8	588,8	— 1,0	— 0,17
7.	535,8	534,3	— 1,5	— 0,28
8.	370,1	369,8	— 0,3	— 0,08
9.	102,3	98,6	— 3,7	— 3,62
10.	647,5	647,3	— 0,2	— 0,03
11.	774,4	772,4	— 2,0	— 0,26
12.	806,2	805,7	— 0,5	— 0,06
13.	863,6	865,3	+ 1,7	+ 0,20
14.	840,9	840,9	—	—
15.	619,9	619,7	— 0,2	— 0,03
16.	182,0	177,6	— 4,4	— 2,42
17.	740,1	739,2	— 0,9	— 0,12
18.	841,3	838,7	— 2,6	— 0,31
19.	947,1	943,4	— 3,7	— 0,39
20.	952,8	949,6	— 3,2	— 0,34
21.	803,5	802,4	— 1,1	— 0,14
22.	599,3	597,8	— 1,5	— 0,25
23.	150,0	147,2	— 2,8	— 1,87
24.	813,3	813,8	+ 0,5	+ 0,06
25.	964,6	961,6	— 3,0	— 0,31
26.	893,1	889,2	— 3,9	— 0,44
27.	849,8	848,7	— 1,1	— 0,13
28.	770,8	768,0	— 2,8	— 0,36
29.	639,4	639,0	— 0,4	— 0,06
30.	127,7	126,1	— 1,6	— 1,25
31.	689,2	690,2	+ 1,0	— 0,15
5.—31. 7.	17790,4	17751,2	— 39,0	0,22

débitmètres, il s'agissait dans les deux cas d'appareils de modèles récents, réétalonnés périodiquement à l'aide du manomètre différentiel. Les comparaisons furent faites sur la base des inscriptions des machinistes dans les rapports d'exploitation, qui

indiquent chaque fois à minuit les totaux de tous les débitmètres. A la Handeck, le débit fut déterminé par la somme des enregistrements des débitmètres des 4 turbines et, à Innertkirchen, par la somme des enregistrements des débitmètres des 3 turbines.

Le résultat de ces mesures comparatives est consigné au tableau IV. On constatera que, durant cette période de mesures de 27 jours, l'enregistrement du débit de l'eau des deux usines est de 0,22 % plus petit à Innertkirchen qu'à la Handeck. En outre,

qui indique le rendement moyen de l'usine d'Innertkirchen durant la période allant du 1^{er} août au 30 novembre 1944. Les valeurs des samedis et des dimanches n'y figurent pas, car elles ne peuvent pas être comparées aux valeurs des autres jours de la semaine, en raison des conditions de charge très différentes.

La figure 14 montre que le rendement a baissé lentement du 1^{er} août au 12 octobre, du fait de l'altération des pointeaux et des tuyères des injecteurs des turbines. Entre le 16 et le 22 octobre,

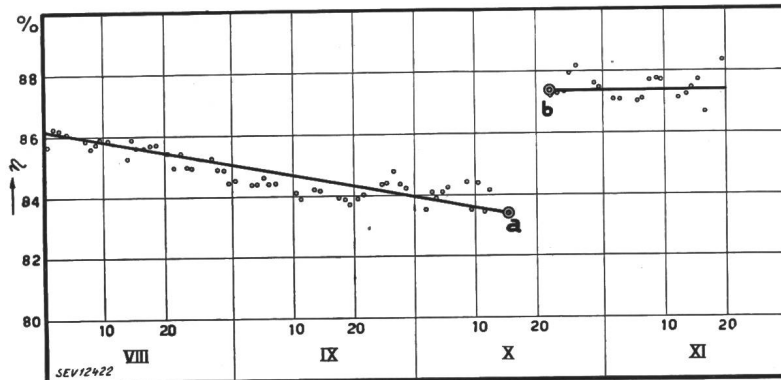


Fig. 14.

Variation du rendement journalier moyen de l'usine d'Innertkirchen, calculé d'après les lectures des compteurs de kWh et des débitmètres relevées en service (d'août à novembre 1944)

a—b Durant cette période, les pointeaux et les tuyères usés furent remplacés dans les trois groupes de machines.

cet écart ne présente que de très faibles dispersions, qui ne dépassent pas 1 %, sauf les dimanches, durant lesquels les dispositifs de jaugeage fonctionnaient dans des conditions défavorables à ces charges partielles.

L'étalonnage des venturimètres de la Handeck et d'Innertkirchen ayant été opéré sur la base des mesures aux moulinets, la bonne concordance des mesures comparatives prouve que les mesures aux moulinets effectuées à la Handeck en 1931 concordent pratiquement avec celles d'Innertkirchen en 1943. Ce résultat est d'autant plus remarquable que ces deux mesures furent entreprises non seulement avec un appareillage complètement différent, mais aussi dans des canaux différents.

L'importance pratique des déterminations journalières du rendement est illustré par la figure 14,

les pointeaux et les tuyères des 3 turbines furent remplacés, et le rendement s'est relevé de 4 % pour atteindre environ 87,5 %, c'est-à-dire à peu près la valeur qui avait été mesurée sous charge moyenne de l'usine, lorsque les injecteurs étaient encore neufs.

Cet exemple prouve combien un contrôle permanent du rendement est important pour l'exploitation rationnelle d'une grande usine hydroélectrique. Les dépenses faites dans le but de permettre ce contrôle sont donc pleinement justifiées, puisqu'une très légère amélioration du rendement permet un accroissement considérable de la production d'énergie. Ainsi, dans le cas de l'usine d'Innertkirchen, une amélioration du rendement moyen de 1 % permet d'augmenter de 3,7 millions de kWh la production annuelle d'énergie électrique.

Application pratique au réglage fréquence-puissance

Par E. Soloveicik, Zoug

621.316.728

Après avoir rappelé les principes fondamentaux de la méthode de réglage fréquence-puissance, l'auteur décrit un appareillage automatique enregistrant continuellement les écarts moyens de la fréquence et les puissances moyennes échangées entre deux complexes voisins.

Es werden vorerst die Grundlagen der Frequenz-Leistungs-Regulierung in Erinnerung gerufen. Anschliessend beschreibt der Autor eine Einrichtung zur automatischen und kontinuierlichen Registrierung der mittleren Abweichung von der Normalfrequenz und des Energie-Austausches zweier gekuppelter Netze.

L'extension des interconnexions de grands réseaux électriques et l'expérience acquise dans ce domaine durant les dix dernières années a démontré

que, pour assurer une exploitation rationnelle des réseaux de transport d'énergie, les puissances échangées entre chaque participant à l'interconnexion et