

Cette formule montre que si l'on fait :

$$\alpha = 1 \quad (1), \quad \lambda = \frac{4\pi}{13} \quad (2),$$

on aura :

$$\zeta_7 = 1,56 \frac{av_0}{g}$$

Or, si la conduite avait partout le diamètre de la partie inférieure, le coup de bélier maximum, égal au coup de bélier initial, serait égal à  $\frac{av_0}{g}$ . On voit donc que, dans ce cas l'élargissement de la partie supérieure de la conduite aura augmenté le maximum du coup de bélier de 50 pour 100. On remarquera de plus que ce coup de bélier se produit à la fin de la sixième période élémentaire, c'est-à-dire à la fin de la première oscillation complète pour la conduite entière ; on a, en effet, pour la période correspondant à la conduite entière :

$$T = \frac{2l}{a} + \frac{2l'}{a'} + \frac{2l''}{a''} = \frac{6l}{a} = 3T_1,$$

d'où :

$$2T_1 = 6T \quad (3).$$

Dans les expériences d'Allevard, où la partie supérieure de la conduite était plus large, on reconnaît, en soumettant le phénomène au calcul, qu'on aurait dû enregistrer un résultat semblable. Cela a bien eu lieu pour certaines expériences, mais pas dans le plus grand nombre ; cette anomalie s'explique par ce fait, que, vu le peu de longueur de la partie élargie, la surpression n'aurait dû se produire que pendant 0,16 seconde environ et que le manomètre employé n'était pas en état d'enregistrer d'une façon rigoureuse des phénomènes d'une durée aussi courte.

## STATIONS D'ESSAIS DE TURBINES DE LA MAISON J.-M. VOITH

— ( SUITE ) —

### STATION D'ESSAIS DE BRUNNENMUHLE

CONDITIONS GÉNÉRALES. — La demande de force étant très variable à l'usine d'Heidenheim, il s'agissait de créer d'une part une station accumulant l'énergie produite pendant la nuit à Hermaringen, et d'autre part une station permettant d'effectuer des essais sur turbines à haute chute, et d'étudier la répercussion des conduites sur le réglage des turbines.

Brunnenmühle, situé à proximité de la fabrique Voith, au pied d'une colline de 97<sup>m</sup>50 de hauteur au-dessus du niveau de la rivière, est particulièrement favorable pour cette double installation. L'eau de la Brenz étant troublée par les différentes industries textiles de Heidenheim, on utilise, pour alimenter le bassin d'accumulation, l'eau d'une source claire et abondante qui jaillit dans le voisinage immédiat. Cette source actionnait jusqu'ici la turbine du moulin, et est capable de développer 38 HP pour un débit de 2 m<sup>3</sup> et une hauteur de chute de 1<sup>m</sup>80.

INSTALLATION ACCUMULATRICE. — Les dimensions du bassin furent calculées pour accumuler la puissance moyenne produite soit 30 HP sur l'axe de la turbine de Brunnenmühle et 300 HP sur l'axe des turbines d'Hermaringen.

(1) En supposant par exemple  $d = d'$ ,  $a = a'$ .

(2) D'où l'on conclut  $\beta = 0,55$  et par suite, si  $a' = a''$ ,  $d'' = 1,35 d$ .

(3) Cette remarque est importante, car si les expériences d'Allevard ont montré que, pendant les premières oscillations, le phénomène se conforme à la théorie de M. Allièvi, il tend ensuite à se produire un mouvement d'ensemble.

La journée de travail à l'usine est de 9 h.  $\frac{1}{2}$  ; il reste 14 h.  $\frac{1}{2}$  pendant lesquelles l'énergie disponible, soit 240 chevaux au tableau d'Hermaringen et 25 à celui de Brunnenmühle, peut actionner les pompes. En admettant 68 pour 100 de rendement pour la station des pompes (92 % pour le moteur et 74 % pour la pompe) et 98 pour 100 pour la conduite, l'énergie potentielle sera  $265 \times 0,68 \times 0,98 \times 75 = 13.230$  kilogrammètres par seconde.

La différence d'altitude entre le niveau de la fosse d'aspiration et le niveau moyen dans le réservoir étant de 96<sup>m</sup>5, la quantité d'eau accumulée sera de :

$$\frac{13\ 230}{96,5} = 137 \text{ litres par seconde.}$$

Pour déterminer la capacité du réservoir, il faut considérer que l'eau pompée pendant le repos de midi, soit 1 h.  $\frac{1}{2}$ , est utilisée déjà dans la seconde moitié de la journée.

Elle sera donc de :

$$13 \times 3\ 600 \times 0,137 = 6\ 410 \text{ mètres cubes}$$

Le réservoir a une capacité largement suffisante de 7 000 m<sup>3</sup>. On a négligé dans ce calcul l'énergie disponible

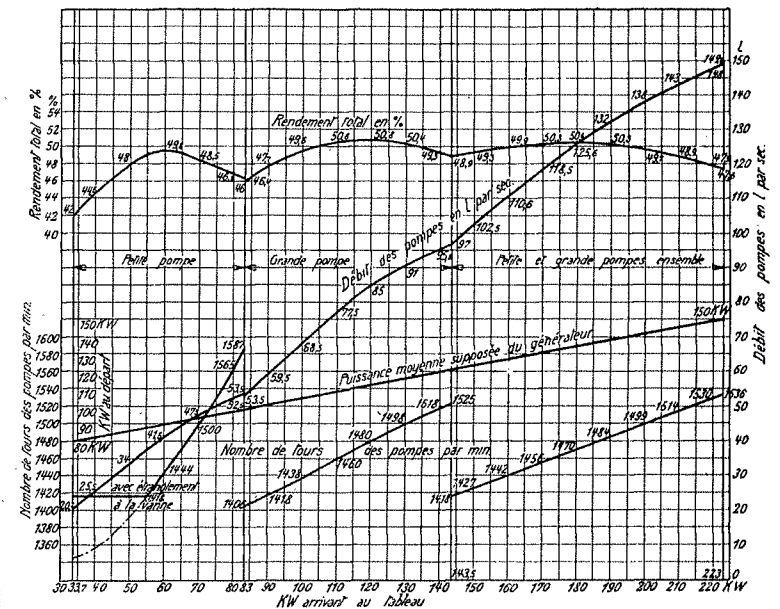


FIG. 29. — Diagramme des rendements.

le dimanche, néanmoins elle contribue à augmenter le rendement de l'installation surtout pendant la période des basses eaux.

Comme la puissance de la station d'Hermaringen est très variable et que les ateliers absorbent pour leur travail de nuit de 30 à 70 chevaux, la puissance disponible tombe à une faible valeur à certaines périodes de l'année ; aussi, pour obtenir un rendement moyen satisfaisant, la station de pompes fut composée de 2 groupes de puissances différentes, l'un de 160 et l'autre de 80 chevaux.

La turbine alimentée par ce bassin d'accumulation doit avoir une puissance suffisante pour couvrir la demande d'énergie pendant les fortes pointes du service ; cette puissance est néanmoins limitée par le fait que son rendement et celui de sa génératrice électrique diminuent aux faibles charges demandées pendant quelques heures de la journée. Elle est du type tangentiel et a été prévue pour développer 240 chevaux. (Voir la planche ci-annexée),

Les figures 24 à 28 représentent les deux pompes, la turbine tangentielle et la turbine à basse chute qui actionne une petite génératrice asynchrone.

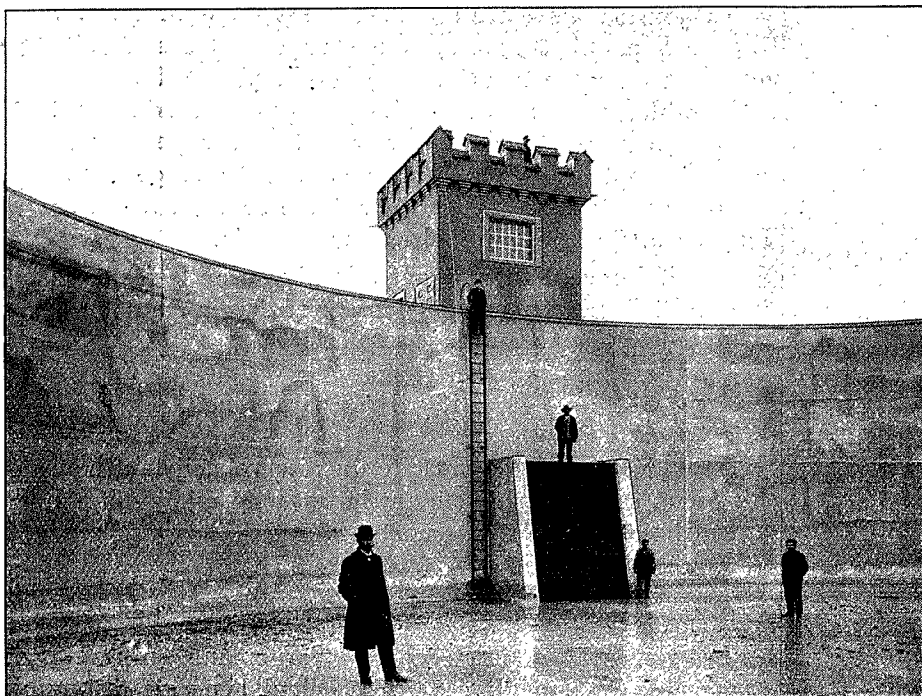


FIG. 31. — INTÉRIEUR DU RÉSERVOIR DE LA STATION ACCUMULATRICE.

La figure 29 donne les principales caractéristiques du rendement des pompes ainsi que le rendement global de l'installation accumulative. Ce rendement, qui varie de 45 à 51 pour 100 et atteint 49 pour 100 en moyenne, peut sembler peu élevé ; néanmoins, il est suffisant pour mettre en évidence les avantages de ce système : frais d'entretien minimes, et grande facilité d'adaptation aux charges variables.

Un point important à considérer est la proportion qui existe entre le temps disponible pour accumuler l'eau et celui pendant lequel on l'utilise. Dans le cas d'usines, ouvertes 9 heures 1/2 par jour et fermées le dimanche, cette proportion est assez favorable.

**RÉSERVOIR.** — Le réservoir est situé au sommet d'une colline à peu de distance de Brunnenmühle. Il est en béton armé ; sa forme est circulaire. Les études ont conduit à lui donner une profondeur de 7 mètres pour 36 mètres de diamètre intérieur (Voir fig. 30 à 32).

Le rocher de fondation est formé de calcaire jurassique qui, bien que crevassé, est assez résistant. Le radier du réservoir est établi sur une couche de béton armé variant de 0<sup>m</sup>60 à 3<sup>m</sup>40 d'épaisseur suivant les besoins.

Les déblais ont été déposés sur le bord de la fouille et servent à provoquer une contrepoussée aidant à la résistance de la paroi du réservoir. Celle-ci a été calculée pour résister, avec un coefficient de sécurité suffisant, à la poussée du remblai quand il est vide.

Pour augmenter la résistance du mur, des fers horizontaux ont été placés à l'intérieur ; ils sont seuls intervenus dans les calculs statiques. Des barres verticales et des tringles horizontales en fer placées près de la surface s'opposent à tout lézardement. Un contrefort extérieur en forme de corniche sert à renforcer la partie supérieure. Le fond du réservoir, armé par des fers ronds de 5 mm., a 20 centimètres d'épaisseur.

Une grille calculée très largement est placée devant la prise d'eau ; ses barreaux sont espacés de 15 millimètres.

La chambre des vannes contient un robinet-vanne et une valve papillon (fig. 33 et 34) placés sur la conduite principale. Le papillon est commandé de la centrale par un moteur électrique. On ne le manœuvre, d'ailleurs, qu'à l'arrêt de la turbine et pour s'assurer de son bon fonctionnement.

Un appareil de fermeture automatique en cas de rupture est placé sur la partie droite de la conduite ; cet appareil entre en fonction dès que la vitesse dans la conduite dépasse une quantité déterminée, et produit la fermeture de la valve papillon en agissant sur le moteur de la valve. Des lampes placées dans la centrale contrôlent le fonctionnement de ce mécanisme.

Une dérivation se raccordant à la colonne principale dans la chambre des vannes sert exclusivement aux essais. La chambre des vannes contient en outre une conduite de remplissage et de vidange, un renillard placé derrière le papillon et un flotteur pour l'appareil indicateur de niveau.

Un câble à basse tension pour la transmission des indications du niveau d'eau, et un câble à haute tension pour la commande de la vanne et l'éclairage sont placés dans une tranchée séparée et distante de 5 mètres de la conduite forcée.

Cette conduite forcée a 400 millimètres de diamètre intérieur et 326 mètres de longueur. Elle est placée à un mètre de profondeur dans le sol. Sauf quelques viroles de fonte placées dans la chambre des vannes, elle est entièrement en tôle d'acier soudée. Son épaisseur varie de 4 millimètres au sommet à 7 millimètres à la partie inférieure. Cette épaisseur a même été portée à 9 millimètres au passage sous une route. La conduite repose sur des massifs de béton ; elle est, aux coudes, scellée sur ces massifs, pour résister à la poussée axiale. On n'a pas prévu de joints de compensation.

**STATION DES POMPES.** — Les deux pompes sont raccordées à la conduite. L'eau, prise dans le canal R (voir fig. 24 à 28 et 35), va à la fosse d'aspiration par le canal K. Le canal K peut être fermé par une vanne (non indiquée sur les figures) permettant de vider la fosse d'aspiration dans le canal de fuite.

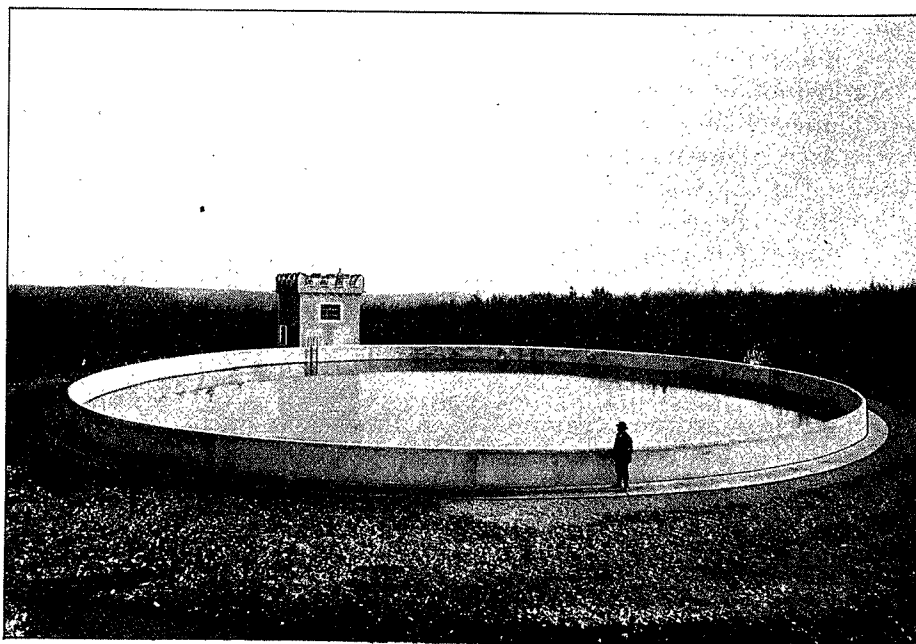


FIG. 32. — VUE GÉNÉRALE DU RÉSERVOIR ACCUMULATEUR.

La grosse pompe refoule normalement 89 litres par seconde et la petite 43. La grosse pompe est à deux étages, la petite à trois étages ; leur vitesse commune est de 1 500 tours par minute à pleine charge. Ces deux pompes sortent des ateliers Sulzer Frères à Winterthur (Suisse). Chaque pompe est placée, avec son moteur à courant alternatif de 500 volts, sur une plaque de fondation commune ; les deux groupes sont munis d'accouplements flexibles Zodel-Voith.

La mise en service des pompes se produit en accouplant électriquement leurs moteurs à l'arrêt avec la génératrice de la turbine tangentielle, puis en mettant cette dernière en marche. Quand les moteurs ont atteint leur vitesse normale, les robinets-vannes des pompes étant fermés, ils sont enclanchés sur le réseau d'Hermaringen, et la turbine tangentielle mise à l'arrêt. Cette manœuvre, qui semble à l'abord quelque peu compliquée, s'effectue rapidement avec un peu d'habitude.

Nous avons mentionné précédemment que, pour utiliser entièrement la force hydraulique d'Hermaringen, les régulateurs agissent sous l'influence seule des flotteurs indépendamment du nombre de tours. Comme la puissance absorbée et le débit des turbo-pompes diminuent rapidement avec la vitesse, les choses sont disposées pour que la différence du nombre de tours à demi et pleine charge n'atteigne que 7,5 pour 100. En tenant compte des variations du niveau d'eau dans le réservoir, la variation de vitesse ne dépasse pas 11 pour 100. Pour la marche industrielle, les variations brusques restent dans des limites beaucoup plus restreintes et il suffit de laisser aux pompes le réglage de vitesse de toute l'installation.

La turbine tangentielle représentée figures 36 et 37 possède des aubes ellipsoïdales et deux injecteurs. Sa puissance normale est de 240 chevaux à la vitesse de 500 tours par minute, mais elle peut atteindre un maximum de 290 chevaux. Le régulateur, de même construction que ceux d'Hermaringen, agit sur l'aiguille des deux injecteurs, et commande en outre un régulateur de pression empêchant, en cas d'arrêt brusque, la formation de coups de bélier dans la conduite. L'arbre de la turbine porte, du côté du local d'essais, un volant avec couronne en acier moulé ; il est accouplé directement de l'autre côté avec une dynamo de 180 KVA. L'eau de la turbine tangentielle s'écoule dans le bassin d'alimentation de la turbine à basse chute qui l'utilise également.

La turbine Voith à basse chute, alimentée par l'eau de la source, est du type Francis à axe vertical. Elle est munie d'un réglage à main ; elle commande au moyen d'engrenages coniques et de courroies un alternateur asynchrone de 24 kilowatts, et une petite dynamo à courant continu, de 110 volts, qui sert à l'éclairage de la centrale et à l'excitation de l'alternateur.

La centrale comprend aussi un tableau de distribution complet, des appareils de sûreté et deux transformateurs de 90 et 150 KVA qui élèvent ou réduisent la tension de 500 à 10.000 volts ou vice-versa. Ces transformateurs sont placés dans un local séparé situé à côté du tableau. Les deux étages supérieurs renferment les parafoudres.

La ligne à haute tension va en ligne droite rejoindre un pylône métallique de la ligne Hermaringen-Heidenheim. Elle est munie d'un interrupteur. La centrale est munie d'un appareil enregistreur le niveau de l'eau du bassin, et d'un appareil téléphonique.

STATION D'ESSAIS. — Le local d'essais est placé à côté de la salle des turbines et des pompes de la station accumulatrice.

Une bifurcation de la conduite forcée, fermée par un robinet-vanne y aboutit. Le bâtiment est desservi sur toute sa longueur par 2 ponts-roulants de 4 tonnes chacun.

Le canal d'essai V est disposé perpendiculairement à l'axe longitudinal du bâtiment (voir fig. 24 et 25). Sa largeur est de 2<sup>m</sup>5, son radier est à 0<sup>m</sup>65 au-dessous du niveau de la Brenz. Se raccordant à ce canal, sur lequel les turbines d'essais sont placées, le canal de jaugeage U, d'environ 14 m. de longueur, déverse le débit des turbines dans la Brenz, derrière la sortie de la turbine à basse chute.

Cette station est prévue pour des essais sur les machines suivantes :

- Appareils pour conduites forcées de turbines ;
- Régulateurs pour turbines à bêche fermée ;
- Turbines pour haute chute, spirales et tangentielles ;
- Installations et machines pour la fabrication de la pâte de bois et du papier.

ESSAIS SUR LA CONDUITE DE L'INSTALLATION ET SUR APPAREILS POUR CONDUITES FORCÉES. — Des tubulures de prises prévues à différents points, spécialement aux coudes, de la conduite forcée, venant du réservoir, permettent le placement de manomètres, dans le but de faire des essais sur la perte de charge dans les parties droites et dans les coudes, avec différentes vitesses de l'eau.

Les essais avec coudes d'autres diamètres, et avec les pièces de forme les plus diverses, pièces de raccord, valves à papillon, etc., peuvent être faites dans le local d'essais.

Nous avons mentionné plus haut une deuxième conduite de 400 millimètres qui se raccorde à la colonne principale dans la chambre des vannes, au-dessus de la valve à papillon commandée par moteur électrique. Cette bifurcation, qui peut être isolée, soit du bassin par une vanne, soit de la colonne principale par une autre vanne, sert au placement des pièces d'essais, spécialement des valves de sûreté en cas de rupture de conduite. Les pièces peuvent ainsi être montées sans aucune interruption, et mises en service par une simple manœuvre de vannes.

ESSAIS DE RÉGULATION. — La difficulté du réglage automatique de la vitesse des turbines à bèches fermées s'accroît avec la vitesse de l'eau et avec la longueur de la conduite. Des essais semblables ne pouvant être faits normalement qu'avec la turbine tangentielle et son alternateur, la vitesse maxima de l'eau est limitée par le débit maximum de la turbine.

En prévision d'essais comparatifs sur conduite de différentes longueurs, la bifurcation posée à la tête de la conduite permet l'installation d'une prolongation de tuyauterie de dimensions quelconques à poser dans le bassin. Les organes d'obturation installés permettent d'isoler rapidement la partie prolongée et de remettre la conduite courte en service normal.

Le câble pour l'indicateur de niveau contient également deux fils téléphoniques permettant une communication rapide entre la centrale et la chambre des vannes.

Pour les essais de réglage, une résistance liquide à trois éléments, semblable à celle d'Hermaringen, a été installée en W (fig. 24 et 25), au-dessous de la chambre à haute tension. Les 4 déclancheurs nécessaires sont placés sur le tableau. La couronne du volant claveté sur l'arbre de la turbine se compose d'anneaux assemblés, ce qui permet de faire varier la masse des parties tournantes. La valeur minima de cette masse, représentée par le rotor de la génératrice, possède un  $PD^2$  égal à 1 150 kilogrammètres.

**ESSAIS SUR TURBINES.** — La station de Brunnenmühle permet des essais sur turbines spirales (fig. 38 et 39) et sur turbines tangentielles. Le canal d'essais a été placé assez bas pour permettre d'installer des tuyaux d'aspiration de longueur suffisante. Cette disposition permet également de faire des essais d'hydropneumatisation sur les turbines tangentielles. Le débit disponible pour les essais atteint environ 500 litres par seconde. Il permet l'épreuve de turbines atteignant une puissance de 500 chevaux environ. La chute totale maxima avec le réservoir plein, atteint 101<sup>m</sup>10 jusqu'au niveau d'aval dans le canal d'essais. Cette chute peut être diminuée à volonté par étranglement. Dans le but d'éviter qu'à la suite d'un changement d'état d'équilibre, la pression ne vienne à dépasser celle prévue pour la turbine d'essais, un manomètre avertisseur, réglé pour entrer en

guille, fixée au fil, indique sur une échelle la profondeur cherchée. Une plaque horizontale, placée sur le flotteur, tôle de cuivre, à une hauteur déterminée au-dessus du niveau de l'eau, permet le contrôle et la mise au point de l'aiguille.

On emploie également pour les jaugeages un déversoir sur les trois côtés. L'épaisseur de la nappe déversante est lue directement dans le local d'essais à l'échelle du flotteur. Des jaugeages effectués simultanément avec l'écran mobile et le déversoir permettent de contrôler les résultats surtout dans les cas de faible débit.

Le volume d'eau débité pendant un essai peut être exactement déterminé après l'étalonnage de la contenance du réservoir. L'appareil enregistreur du niveau amont donne les hauteurs de l'eau au début et à la fin de l'essai ; connaissant

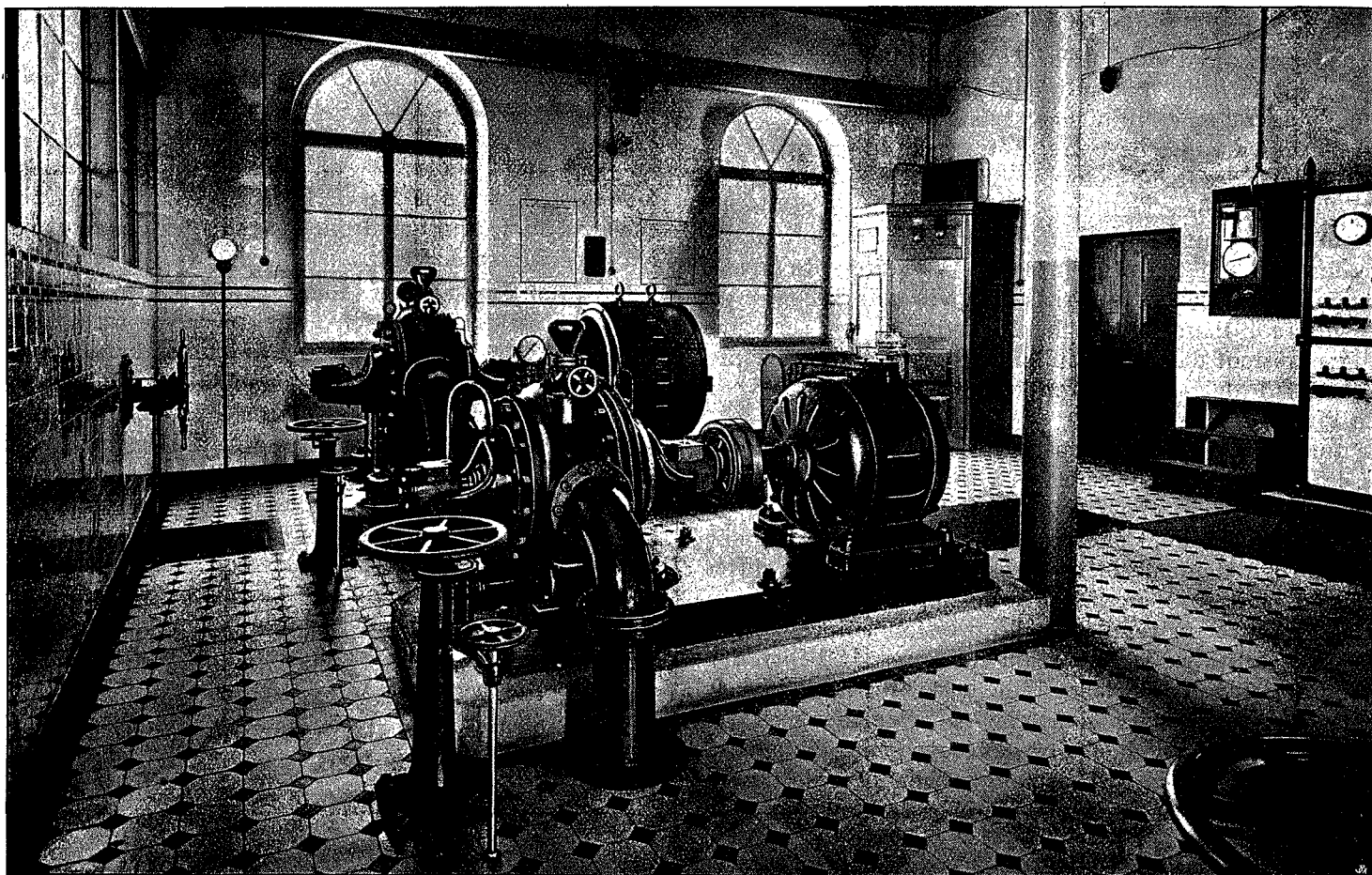


FIG. 35. — CHAMBRE DES POMPES DE LA STATION D'ESSAIS DE BRUNNENMÜHLE.

fonction à une pression déterminée avant chaque essai, agit sur une sonnerie qui se fait entendre dès que la pression dépasse la limite voulue.

À Brunnenmühle, la hauteur de chute est mesurée par un manomètre qui est étalonné avant et après les essais, avec la pression hydrostatique de la conduite; la différence d'altitude a été établie par un nivellement précis.

Le débit peut être jaugé soit avec un écran mobile, soit avec un déversoir. Le canal de jaugeage a un mètre de largeur et 12 mètres de longueur, ses parois latérales sont élevées à la hauteur voulue pour le déversoir. Un écran mobile, semblable à celui d'Hermaringen, permet d'enregistrer la vitesse de l'eau, au moyen de 9 contacts électriques, équidistants d'un mètre, boulonnés sur un des rails. Un trottoir longe le canal et facilite le service.

Un flotteur, logé dans la niche S, permet de déterminer la profondeur de l'eau. Ce flotteur est fixé à l'extrémité d'un fil métallique tendu par un contrepoids (fig. 42). Une ai-

sa durée et le volume de la zone comprise entre les deux vaux, il sera facile d'obtenir le débit cherché.

Il est possible de fermer le canal de jaugeage soit par la paroi du déversoir, soit par un tablier qu'on peut fixer dans des rainures prévues à cette fin. La turbo-pompe (fig. 28), actionnée par la turbine à basse chute, permet alors de le vider rapidement. Il est alors facile de poser exactement un raccord, un tuyau d'aspiration pour la turbine d'essais ou de régler exactement le déversoir.

On détermine la puissance des turbines tangentielles des turbines spirales à vitesse moyenne au moyen du fre de Prony. Pour cela, on utilise soit l'appareil avec levier fer, poulie de 600 millimètres et circulation d'eau intérieur tel qu'il a été décrit précédemment, soit l'appareil normal tel qu'on l'emploie fréquemment dans les essais de réception de turbines puissantes.

Pour les turbines spirales à grande vitesse, comme il est difficile d'obtenir un état d'équilibre stable avec le fre

habituel à friction, on emploie un frein à eau où le frottement d'une jante sur une poulie est remplacée par la résistance de disques en tôle tournant dans l'eau. Ici également la vitesse est relevée sur le graphique au moyen d'un contact électrique marquant chaque tour, ou au moyen d'un compteur de tours pendant la durée de l'essai. Un tachymètre commandé par courroie facilite la mise au point d'une vitesse précise ou de la vitesse d'équilibre.

Pour faciliter des essais sur la turbine de service, son débit peut être conduit par le raccord N (fig. 26) dans le canal de jaugeage. Son arbre, prolongé au delà du volant, peut être accouplé avec un contre-arbre, monté sur deux paliers, sur lequel on peut placer un frein.

Il est possible, ici comme à Hermaringen, de déterminer exactement le rendement de la génératrice, y compris les

mise en service définitif fin janvier 1908. Le réservoir pour la station accumulatrice, commencé le 1<sup>er</sup> avril 1908, fut complètement terminé fin septembre de la même année. La conduite forcée posée et l'installation des machines une fois terminée, le service normal fut ouvert le 14 novembre 1908. La maison Nöding et Stober, de Pforzheim, fut chargée des travaux hydrauliques; les génératrices et le tableau d'Hermaringen ont été livrés par la Société d'électricité A. E. G. La maison Siemens Schuckert fournit les transformateurs, les lignes de transport de force et tout l'équipement de Brunnenmühle (1).

Les deux stations, installées pour permettre les essais de turbines de différentes grandeurs et de types très divers, ont donné les meilleurs résultats depuis leur mise en marche.

CONCLUSION. — Nous avons donné dans cet article sous une

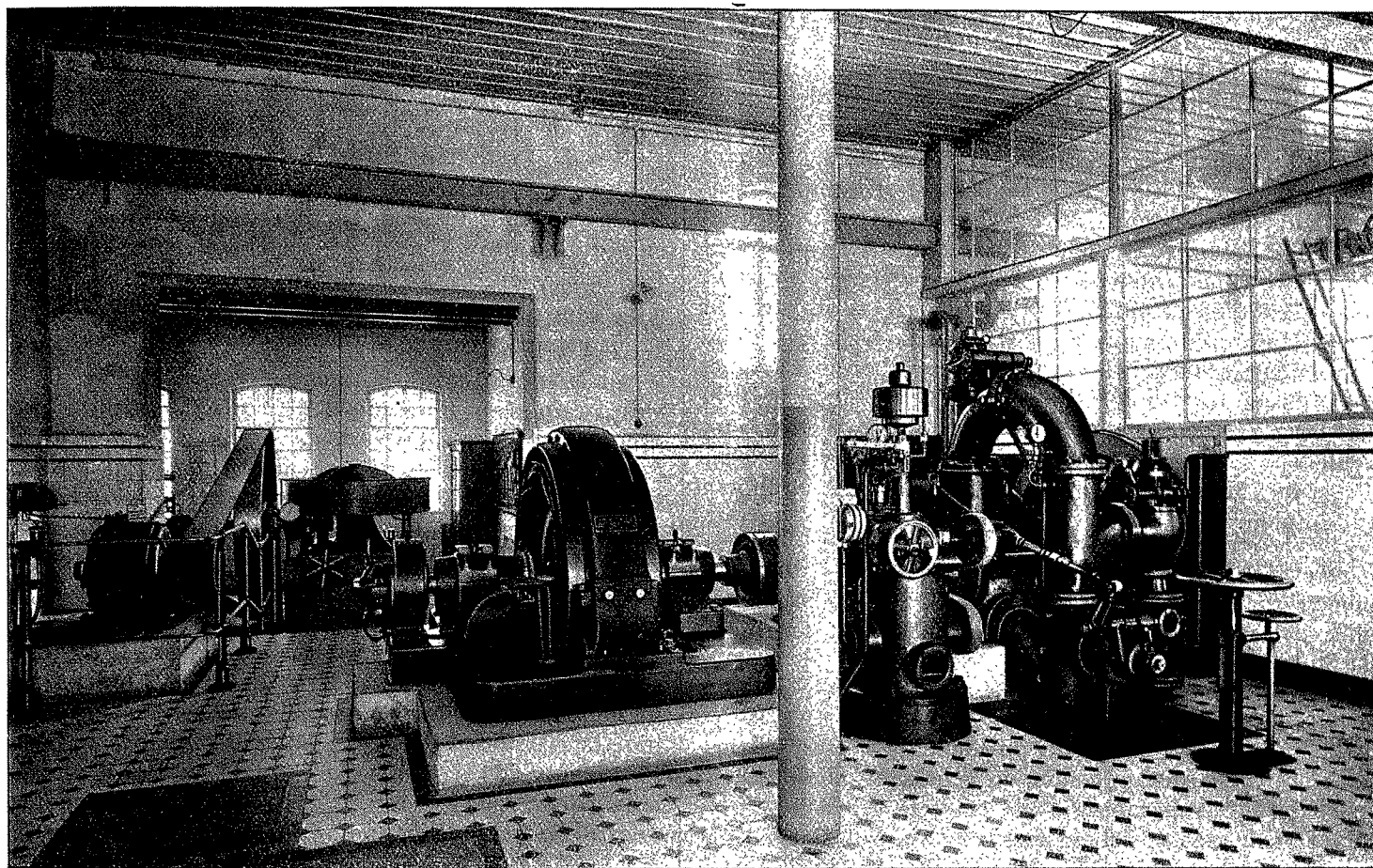


FIG. 37. — CHAMBRE DES TURBINES ET ALTERNATEURS DE LA STATION DE BRUNNENMÜHLE.

frottements de l'air et des paliers en se servant des résistances liquides.

ESSAIS DE MACHINES POUR LA FABRICATION DU PAPIER. — Ces essais sont effectués ordinairement à l'usine d'Heidenheim. Cependant, au printemps, pendant la période des hautes eaux, quand toute l'énergie accumulée est disponible, on fait à Brunnenmühle les essais des grosses machines, des défibreurs notamment, qui absorbent une puissance considérable. Ces appareils peuvent être installés dans la station avec toutes leurs machines accessoires, et actionnés par le contre-arbre au moyen de courroies ou de câbles.

La puissance maxima disponible sur l'arbre de la turbine tangentielle est de 290 chevaux. Cette puissance peut être portée à 500 chevaux en faisant travailler la génératrice directement accouplée comme moteur.

\* \* \*

La station d'Hermaringen, commencée en juillet 1907, fut

forme succincte des détails sur les stations d'essais que la maison Voith a établies près de ses ateliers. Tous les constructeurs comprennent quels avantages ils peuvent retirer d'une installation analogue. Une station d'essais bien outillée est pour eux une source inépuisable de renseignements précieux. Elle leur permet d'étudier des appareils nouveaux, de rechercher les formes, les dimensions, les types qui conviennent le mieux dans chaque cas particulier; elle leur donne enfin la possibilité de modifier de petits détails, de mettre au point leurs turbines et de ne livrer à leurs clients que des machines sur lesquelles ils ont des données complètes et précises. Ils peuvent ainsi signer des engagements qu'ils auraient peut-être hésité à prendre dans d'autres conditions.

Dr. ing. FR. OESTERLEN.

(1) Pour la première partie (Station d'Hermaringen pour turbines à basse chute), voir le numéro de Juillet avec sa Planche-Annexe.