

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 50 (1924)
Heft: 18

Artikel: Energie perdue par les organes de décharge des turbines hydrauliques
Autor: Calame, Jules
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-39092>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.07.2025

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

Energie perdue par les organes de décharge des turbines hydrauliques

par Jules CALAME, ingénieur.

(Suite.)¹

3. Compensation des erreurs dans l'évaluation de la perte d'eau.

Les formules qui précèdent permettent d'évaluer la perte d'eau unitaire avec le même degré d'approximation que représente l'adoption des courbes schématiques des figures 6 et 8 vis-à-vis des courbes réelles (par exemple de la courbe *C*, fig. 4) correspondant à telle exécution déterminée. Il est d'ailleurs possible, dans chaque cas particulier et si on le juge utile, de rectifier les courbes schématiques en choisissant comme hauteur des triangles respectifs une ordonnée telle, que ce triangle ait exactement l'aire de la surface qui serait limitée par la courbe résultant des essais ou encore : telle que le triangle partiel de perte d'eau qui se rapproche le plus de la courbe d'essai, soit celui pour lequel s'effectuent le plus grand nombre de décharges pendant la durée d'observation. A l'aide de ce triangle équivalent, on calculera ensuite les diverses pertes d'eau partielles.

Il n'y a pas lieu, en général, de rechercher une pareille exactitude, si l'on se borne à un jugement *qualitatif*. Il faut remarquer, en effet, que si un diagramme d'exploitation se reproduit chaque jour suivant un rythme indéniable (la mise en marche d'unités nouvelles aux heures de service, le départ des trains suivant l'horaire) les pointes n'en sont pas moins différentes d'un jour à l'autre en nombre et en grandeur, de sorte que la perte d'eau totale, fût-elle mesurée avec toute l'exactitude désirable, est appelée à varier entre des limites qui dépassent certainement la correction qu'on serait à même d'apporter aux résultats très simples des formules précédentes, par la considération de valeurs d'essai. L'essentiel est de se rendre compte si le résultat obtenu l'est par défaut ou par excès.

Or la courbe de débit en fonction de la puissance (fig. 1) est en général très régulière et l'on réalise toute l'exactitude désirable en la remplaçant par les deux droites $Q_0 Q_m$ et $Q_m Q_{1/1}$. La proportionnalité entre la courbe réelle du débit et celle de la figure 2 dépend, en revanche, des caractéristiques du régulateur, de l'organe de décharge et de leur liaison. En remplaçant la courbe *C* de la figure 4 par la droite *D*, on admet des débits plus grands que les débits réels aux petites ouvertures, tandis que les débits admis seraient plus petits que ceux existant effectivement entre la moitié environ de l'ouverture et l'ouverture complète. Ce qui revient à dire que la perte d'eau, évaluée sur une pareille base, sera obtenue *par excès* pour les décharges ayant lieu à faible puissance de la turbine, mais *par défaut* si ces mêmes décharges ont lieu aux envi-

rons de la pleine puissance. Il y a enfin compensation partielle pour les décharges chevauchant de part et d'autre du point d'inflexion de la courbe *C*.

Variation de la chute.

Il faudrait, pour être correct, tenir compte aussi de l'influence de la chute nette sur la valeur du débit entrant dans le calcul de la perte d'eau. En donnant les caractéristiques d'une turbine en fonction de la puissance, on indique en effet le débit ramené à une chute constante, égale par exemple à la chute nette moyenne. Or une chute moyenne est, en général, une pure fiction mathématique. A supposer en effet que la chute brute soit la même à toutes les charges de la turbine, les pertes de charges croîtront avec l'augmentation du débit. C'est dire aussi que, si l'on évalue la perte d'eau, comme il a été dit plus haut, à l'aide de la courbe du débit (fig. 2) ramenée à la chute nette moyenne, on calcule en réalité une perte d'eau trop forte pour les faibles décharges et trop faible pour des décharges s'effectuant tout entières aux environs de la pleine charge.

Il est d'ailleurs facile de corriger la valeur des débits entrant en jeu pour tenir compte de la variation de la chute nette. Q_m désignant l'un des débits de la courbe ramenée à la chute nette moyenne H_m , le vrai débit Q_n correspondant à la chute nette effective H_n s'écrit :

$$Q_n = Q_m \sqrt{\frac{H_n}{H_m}} \quad (5)$$

Variation du rendement de l'alternateur.

Comme la valeur de la variation de puissance est fournie en général par les indications d'un wattmètre, il y a lieu pour évaluer les débits correspondant aux diverses puissances absorbées et mesurées sur l'arbre de la turbine, de tenir compte des diverses pertes auxquelles donne lieu le circuit avant le wattmètre et notamment du rendement de l'alternateur. La différence est sans doute peu importante au-dessus de la demi-charge, mais elle n'est plus négligeable au-dessous. A supposer donc qu'on ait admis le rendement de l'alternateur *constant* $= \eta_{1/1}$ et qu'on se propose de tenir compte de la valeur réelle du rendement η_a de l'alternateur correspondant à un débit donné, le débit réel Q_a s'établira simplement, d'après le débit primitif Q_m , en posant :

$$Q_a = \frac{\eta_{1/1}}{\eta_a} Q_m \quad (6)$$

Les considérations précédentes qui trouveraient leur place dans le calcul de la valeur absolue des pertes d'eau n'ont qu'une faible importance dans la recherche de la *perte relative*. Aussi bien ne tiendrons-nous compte dans la suite que de la variation du rendement de l'alternateur qui est la plus importante, admettant en ce qui concerne les autres facteurs que, dans un horaire normal comportant des décharges en deçà et au delà de la demi-charge, les faibles erreurs commises de ce fait se compensent au moins partiellement.

¹ Voir Bulletin technique du 2 août 1924, page 197.

4. Répartition de la charge entre les groupes.

La valeur de la perte d'eau est très différente suivant qu'une décharge d'importance déterminée se produit sur un seul groupe ou, au contraire, se répartit entre divers groupes, couplés en parallèle, et dans la proportion de la puissance réalisée par chacun d'eux. A supposer que les groupes d'une même centrale soient tous de même puissance, tournent à la même vitesse, et que leur statisme soit réglé partout à la même valeur, ces groupes prendront part à la décharge en proportion directe de leur nombre et la perte d'eau se réduira aussi (comme il est facile de le voir en examinant la figure 9 qui ne reproduit d'ailleurs schématiquement qu'une moitié d'un diagramme de perte d'eau) en raison directe du nombre des unités marchant en parallèle :

$$\mathfrak{S}_{1/n} = \frac{1}{z} \left(\frac{1}{n}\right)^2 \mathfrak{S}_{1/1} \quad (7)$$

chaque groupe subissant une perte égale à

$$\frac{1}{z} \cdot \mathfrak{S}_{1/n} = \left(\frac{1}{z}\right) \cdot \left(\frac{1}{n}\right)^2 \cdot \mathfrak{S}_{1/1}.$$

Si, au contraire, les divers groupes sont réglés à des statismes différents, celui de statisme le plus élevé commencera à décharger le premier. A supposer que le deuxième groupe ne commence à fermer que dès l'instant où le premier est déjà complètement fermé ou même que la décharge ne soit prise que par un seul des groupes, la perte d'eau est de plus en plus importante, comme le montre encore la figure 9 b et c qui se passe, croyons-nous, de commentaire. Cette constatation a été faite d'ailleurs depuis longtemps par les usiniers.

Nous admettons dans les calculs qui suivent que les décharges se répartissent uniformément entre les divers groupes tournant en parallèle. Il est bon cependant de noter en passant que si seuls un ou deux groupes assurent l'exploitation réduite (la nuit ou le dimanche) la perte d'eau croît, par rapport à la normale, dans la proportion du nombre des groupes tournant normalement ensemble au nombre de groupes tournant seuls exceptionnellement.

Répartition de la puissance absorbée par le réseau entre les turbines de deux usines marchant en parallèle.

Il peut y avoir intérêt, dans deux usines couplées en parallèle, à régler le statisme des groupes de l'une des

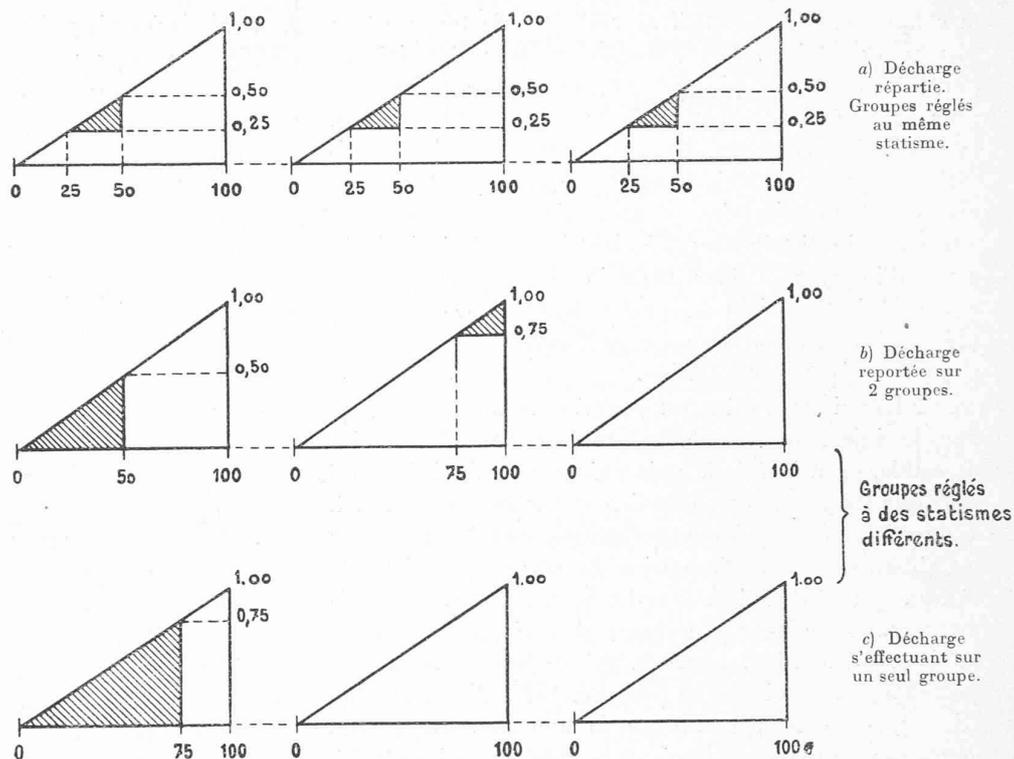


Fig. 9. — Pertes d'eau dans les cas a), b), c).

usines à une valeur différente du statisme des groupes de l'autre. Tous les groupes tournent à la même vitesse, mais la charge qu'ils réalisent en particulier dépend de la valeur de la vitesse de régime et du statisme auquel chacun des groupes aura été réglé.

Comme deux usines hydro-électriques dont les groupes sont solidarisés utilisent en général des chutes différentes en mettant à contribution des bassins versants judicieusement choisis, l'exploitant a un intérêt marqué à faire supporter à l'une des usines un minimum de « puissance constante », tandis que l'autre assure le service des « pointes ». C'est le cas, par exemple, d'une usine à basse chute, utilisant le débit d'une rivière, avec une installation à haute chute, pourvue d'un bassin d'accumulation ; ainsi, par exemple, les usines solidarisées de Spiez et de Kandergrund ou encore celles d'Amsteg et de Ritom dans lesquelles le statisme des groupes est réglé respectivement de 0,5 à 1% (basse chute) et de 2,5 à 3% (haute chute) ce qui a pour conséquence de répartir automatiquement la charge comme il vient d'être dit ¹.

Débit de marche à vide.

Une telle répartition joue encore un rôle, il est vrai de faible importance, au point de vue de la perte d'eau correspondant au débit de marche à vide. Couplé en parallèle, le groupe doit être à chaque instant prêt à prendre

¹ Cependant, comme le montrera plus loin la reproduction partielle des diagrammes de charge de Spiez et de Kandergrund (fig. 11 et 13), le réglage des groupes de ces Usines respectives n'est pas régi uniquement par l'automatisme provenant de la différence du statisme ; la pratique adoptée de la mise au point de la fréquence du réseau à la main, à Kandergrund, a pour conséquence immédiate de faire varier à chaque retouche la répartition de la puissance momentanée entre les deux usines.

la charge et, à cet effet, il ne cesse pas de tourner à la vitesse de régime. Or le couple moteur nécessité par l'entraînement des pièces tournantes pour vaincre la résistance provoquée par le frottement dans les paliers, la ventilation, l'entraînement de la pompe à huile, l'excitation, absorbe un débit appréciable, d'autant plus que le rendement de la turbine est mauvais pour une si faible ouverture du distributeur. L'eau qui se perd ainsi, si elle a peu d'importance dans une usine de basse chute, tant que le débit disponible est surabondant, prend une valeur prépondérante dans une usine de haute chute alimentée par un bassin d'accumulation.

Dès lors si cette usine est pourvue de turbines Pelton dont les injecteurs peuvent fermer avec toute l'étanchéité désirable, on a intérêt à maintenir fermés ces injecteurs tant que les groupes ne fournissent pas de courant, et à assurer la marche à vide de ces groupes en faisant tourner les génératrices sous l'impulsion du courant fourni par le réseau. Ces génératrices fonctionnent alors momentanément *comme moteurs synchrones* et ceci aux heures de faible consommation, durant la nuit et pendant les heures peu chargées du dimanche (voir fig. 15, le diagramme de Ritom), en un mot pendant tout le temps où, sans quelles engendrent du courant, on juge bon de les tenir prêtes à fournir une surcharge éventuelle.

5. Exemples numériques.

Le calcul de la perte d'eau ne présente quelque intérêt que dans les usines hydro-électriques dont la puissance présente fréquemment des variations importantes. A cet égard les usines fournissant le courant nécessaire à la traction électrique sont celles qui méritent, par excellence, d'être envisagées, car c'est bien dans les « groupes de traction » que se produisent les demandes d'énergie les plus soudaines et les plus élevées.

Nous devons à l'amabilité de la Direction des Forces Motrices Bernoises et de M. l'Ingénieur en chef du Service d'électrification des Chemins de fer fédéraux d'avoir pu examiner et reproduire ici partiellement quelques diagrammes caractéristiques de puissance, que nous allons interpréter au point de vue de la perte d'eau.

Les uns ont été relevés dans les Centrales de Spiez et de Kandergrund dont une partie des groupes, couplés en parallèle, sont équipés en monophasé et fournissent le courant à la ligne du Lœtschberg et aux Chemins de fer bernois électrifiés.

Les autres sont des relevés de la Centrale de Ritom dont les groupes, branchés en parallèle sur la ligne du Gothard, assurent la puissance de pointe au delà de la valeur « constante » assignée à la Centrale d'Amsteg.

Ces diagrammes représentent, dans chaque centrale la puissance *totalisée* des groupes de courant monophasé, telle que l'inscrit pendant une journée la plume du wattmètre enregistreur au fur et à mesure de l'enroulement du tambour.

Variations de la puissance.

Parmi les milliers de variations appréciables de la puissance demandée par un réseau, seules¹ les décharges brusques interviennent dans le calcul de la perte d'eau. Elles correspondent sur le diagramme, à des verticales légèrement inclinées vers le temps croissant, et ceci par contraste avec les décharges lentes et progressives qui s'effectuent sans fonctionnement de l'organe de décharge et n'intéressent pas la perte d'eau.

Statistique des décharges.

Il ne peut pas être question ici de calculer séparément la perte d'eau correspondant à chaque décharge. Mais on

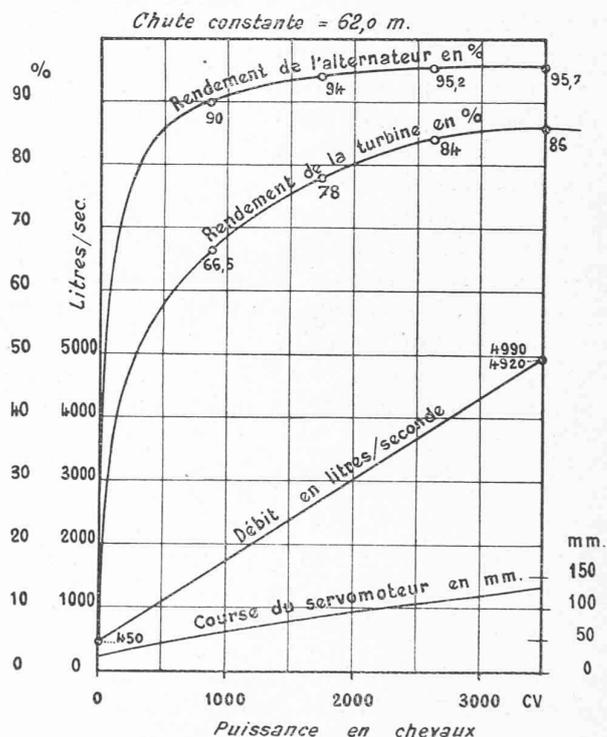


Fig. 10. — Caractéristiques de la turbine XI de Spiez (1923).

$H_n = 62$ m. — $Q = 4990$ l/sec. — $N = 3500$ Ch.
 $n = 333$ tours/min. — $n_s = 113$.

cherchera à grouper les décharges en diverses classes, établies entre une limite inférieure et une limite supérieure. (par exemple : entre 0 et 500, 500 et 1000 kW, etc.) en attribuant au total des décharges d'une classe une valeur moyenne (disons : 250, 750 kW, etc.).

Evaluation des pertes d'eau.

A chaque valeur moyenne des décharges correspond une perte d'eau qu'on établira d'après les formules (3) ou (7) sur la base des valeurs de $\mathfrak{F}_{1/1}$ correspondant soit à l'orifice compensateur (1, 1a ou 1b) soit au déflecteur (4).

¹ On n'a pas jugé utile de compliquer ici le calcul en tenant compte du cas fréquent où la décharge partielle est suivie immédiatement d'une nouvelle charge. L'orifice compensateur, au lieu de fermer lentement en vue de réduire le coup de bélier, ferme au contraire très rapidement (dans un temps égal à celui nécessité par l'ouverture correspondante du distributeur de la turbine), ce qui diminue encore la perte d'eau.

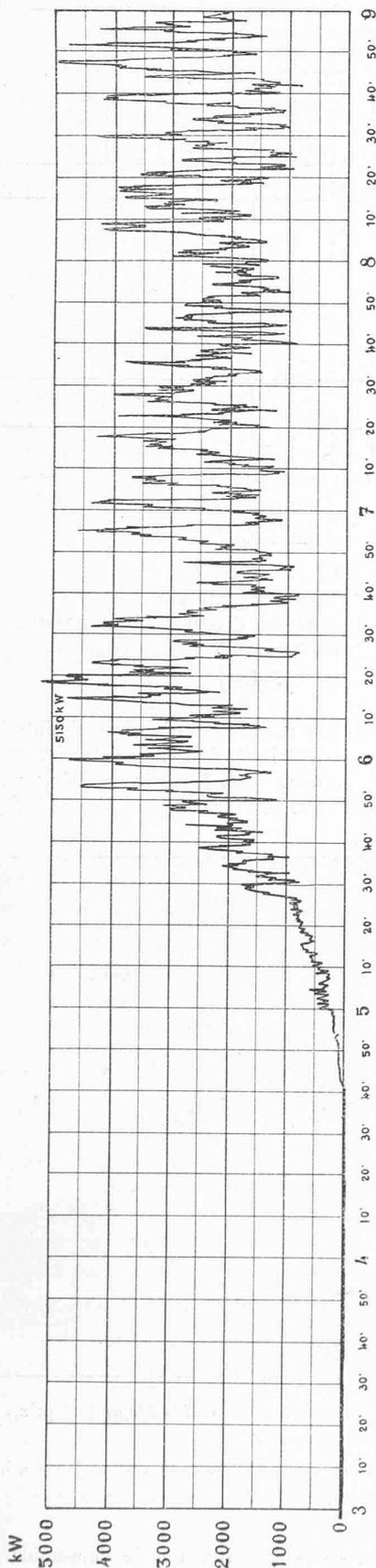


Fig. 11. — FORCES MOTRICES BERNOISES.
Centrale de Spiez.
Diagramme (partiel) de charge du 16 janvier 1924. — Courant monophasé

La perte d'eau d'un jour s'évaluera ensuite en totalisant les produits des volumes d'eau moyens par le nombre des décharges correspondantes¹.

Evaluation de la puissance moyenne.

Pour déterminer l'ordre de grandeur de ces pertes d'eau, il est tout indiqué de les comparer au volume utile qui, pendant le temps correspondant, fait tourner la roue de la turbine, ce qui revient à définir un *coefficient de perte d'eau*. On établira, par exemple, de trois heures en trois heures pendant une journée, l'importance de l'énergie perdue en regard de l'énergie moyenne, soit la *perte d'eau relative* de trois heures ; et ainsi de suite : la perte d'eau de douze heures, d'un jour, etc.

A. CENTRALE DE SPIEZ.

Elle comprend onze groupes dont trois (Nos IX, X et XI) équipés en monophasé. Les turbines de ces trois derniers groupes sont du type Francis avec distributeur à aubes mobiles et *orifice compensateur* synchrone, elles ont été construites par les *Ateliers Piccard, Pictet et Cie* à Genève. La turbine XI réalise les conditions de marche suivantes :

- Chute nette 62 m.
- Débit 4990 l/sec.
- Puissance 3500 chevaux
- Vitesse 333 tours par minute.
- Nombre de tours spécifique $n_s = 113$.

Les caractéristiques de fonctionnement de cette turbine (ramenées à la chute nette constante de 62 m.) sont reproduites sur la figure 10, en fonction de la puissance développée sur l'arbre de la turbine.

- Temps de fermeture du distributeur . . . $\tau_1 = 2$ sec.
- Temps de fermeture de l'orifice synchrone $\tau_2 = 30$ sec.
- Statisme réglé à environ 0,5%.

Quant aux turbines IX et X, qui sont plus anciennes, elles répondent à des conditions de fonctionnement légèrement différentes. Il ne paraît cependant pas nécessaire de les différencier de la turbine XI pour le calcul de la perte d'eau : leur débit unitaire est peu différent de celui de la turbine XI, puisque sous la chute nette de 62 m., les turbines IX et X absorbent un débit de 4400 l/sec. pour réaliser une puissance de 3200 ch.

Analyse du diagramme de puissance.

D'après les renseignements obligeamment communiqués par les *Forces Motrices Bernoises*, les diagrammes des divers jours de la semaine sont très semblables entre eux, en ce qui concerne le nombre et l'importance des pointes, à l'exception toutefois de ceux du dimanche, jour où les trains de marchandises sont supprimés sur la plupart des lignes desservies par la centrale de Spiez.

¹ Il serait facile aussi d'évaluer cette perte en kWh. pendant le temps correspondant, en tenant compte, autant de fois qu'on le jugera utile, des valeurs variables de la chute nette H_n et du rendement η_a de l'alternateur : $KWh. = \eta_a \eta_t \cdot 9,8 \cdot QH_n h.$ (Q débit en $m^3/sec.$; H_n chute nette en m.)

Dans le diagramme du 16 janvier 1924, partiellement reproduit sur la figure 11, la puissance moyenne de vingt-quatre heures fournie par l'ensemble des groupes monophasés de la Centrale de Spiez est de 1408 kW (soit environ 2.160 ch., mesurés sur l'arbre de la turbine) et la puissance maximum atteint 6100 kW (environ 8700 ch.) vers 12 h. 50 min., c'est-à-dire qu'elle a nécessité la marche en parallèle des trois groupes. La plus forte décharge, survenue aux environs de 13 heures, atteint 3100 kW (environ 4500 ch.).

Le nombre des décharges brusques relevées sur le diagramme (fig. 11) et classées par ordre d'importance entre les limites consécutives de 0 et 500 kW, ..., jusqu'à 2500 à 3000 kW figure dans le tableau I.¹

Or la perte d'eau qui résulterait de la décharge brusque complète d'un groupe, de la pleine puissance à zéro, aurait pour valeur, $Q'_{1/1}$ étant admis de 4920 l/sec., soit légèrement inférieur à $Q_{1/1}$:

$$S_{1/1} = \frac{1}{2} 4920 (2+30) = 78720 \text{ litres.}$$

Les décharges fractionnaires, réparties uniformément sur les trois groupes, auront dès lors pour conséquence des pertes d'eau unitaires à établir d'après la formule (7) :

$$S_{1/n} = \frac{1}{z} \left(\frac{1}{n}\right)^2 \cdot S_{1/1}.$$

en proportion de la puissance de pleine charge d'un alterteur, évaluée à 2500 kW.

La colonne 8 donne le nombre de mètres cubes d'eau perdus, évalués comme il vient d'être dit, en proportion des décharges figurant dans les colonnes 1 à 7 et après avoir apporté les corrections relatives à la variation de la chute nette et du rendement de l'alternateur.

La colonne 9 fournit la puissance moyenne telle qu'elle a été évaluée en planimétrant, de 3 en 3 heures, le diagramme de puissance. On a supposé dans la colonne 10 cette puissance uniformément répartie entre les trois groupes, en admettant les régulateurs des trois groupes réglés au même statisme.

En regard, on a inscrit, dans la colonne 11, le volume d'eau réellement utilisé par les trois turbines pendant le temps correspondant, en tenant compte d'après la figure 10 respectivement du rendement de l'alternateur et de celui de la turbine et en corrigeant le résultat obtenu d'après la valeur de la chute nette qui correspondait effectivement, de 3 en 3 heures, à la puissance moyenne développée.

En fin de compte, la perte d'eau est extrêmement faible, puisqu'elle n'atteint, en moyenne, que le 0,87% environ du volume d'eau utile.

¹ Les valeurs qui figurent dans les tableaux suivants ne constituent qu'un résumé du calcul des exemples numériques chiffrés ici; les lecteurs qui s'intéresseraient au calcul complet pourront se procurer sous peu un « tirage à part » complété de l'article ci-dessus.

TABLEAU I: Centrale de Spiez, diagramme du 16 janvier 1924.

Heures	Importance et nombre des décharges							Pertes d'eau totales	Puissance moyenne		Volume d'eau utile	Perte d'eau	
	de	à	< 500 kW	de 500 à 1000 kW	de 1000 à 1500 kW	de 1500 à 2000 kW	de 2000 à 2500 kW		de 2500 à 3000 kW	Total			totale
de	à	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	
0	3	7	1	—	—	—	—	8	9	30	10	14800	0.06
3	6	24	5	1	1	—	1	32	84	470	157	24800	0.34
6	9	100	47	18	8	6	6	185	691	2470	823	65000	1.06
9	12	113	43	15	3	1	1	176	342	1345	448	42500	0.81
12	15	93	44	19	6	5	5	172	608	2410	803	63700	0.96
15	18	118	46	18	6	6	4	198	614	1735	578	50500	1.22
18	21	104	45	23	6	3	1	182	476	1925	642	54200	0.88
21	24	87	30	5	4	—	—	126	198	885	295	31800	0.63
Total		646	261	99	34	21	18	1079	m ³ 3022	—	—	m ³ 347300	—
Moyenne		—	—	—	—	—	—	—	—	1408 kW	470 kW	—	0.87 %

Remarque: La valeur moyenne d'une « pointe » est de 590 kW.

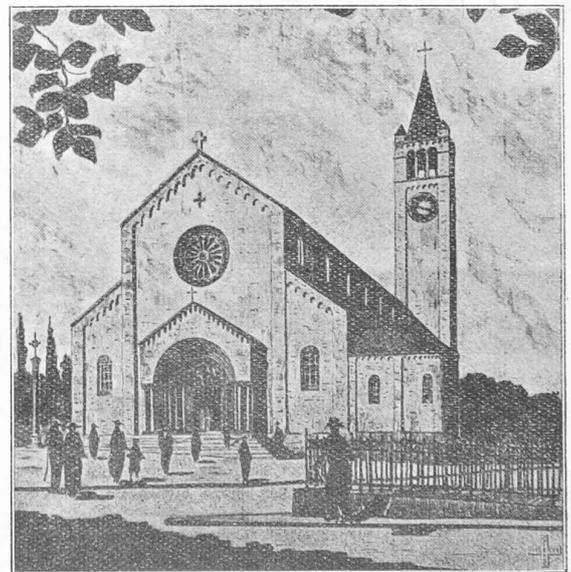
(A suivre)

Concours pour l'élaboration des plans d'une église catholique et d'une cure, à Fribourg.

(Suite.)¹

Rectification.

Par suite d'une erreur regrettable, due à la similitude des « devises », nous avons attribué, dans notre dernier numéro, le 3^e prix et, pour auteurs MM. Lateltin et Dénervaud au projet dont l'auteur est M. G. Meyer et qui a obtenu le 2^e prix.



Perspective du projet de M. Guido Meyer (II^e prix).

Nous complétons la reproduction de ce projet (voir à la page 218 du Bulletin technique du 16 août) par la perspective ci-dessus.

N^o 8. St-Pierre. — Bonne situation de l'ensemble. Place d'entrée au nord bien disposée. Cependant, le Calvaire devrait

¹ Voir Bulletin technique du 16 août 1924, page 218.