

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 92 (1966)
Heft: 25

Artikel: Essais dans l'adduction de l'aménagement hydro-électrique de Simmenfluh
Autor: Khan, Mukhtar Hussain / Dysli, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-68393>

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: 04.05.2025

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole poly-
technique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Groscurin, arch.; J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; J. Favre,
arch.; A. Robert, ing.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION

D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua,
architecte
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 40.—	Etranger	Fr. 44.—
Sociétaires	»	» 33.—	»	» 2.50
Prix du numéro	»	» 2.—	»	»

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie
La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:	
1/1 page	Fr. 423.—
1/2 »	» 220.—
1/4 »	» 112.—
1/8 »	» 57.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales



SOMMAIRE

Essais dans l'adduction de l'aménagement hydro-électrique de Simmenfluh, par M. Hussain Khan, ingénieur AMIE, AM
ASCE, et M. Dysli, ingénieur civil EPUL-SIA.
Bibliographie. — Divers. — Les congrès. — Carnet des concours.
Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Informations diverses.

ESSAIS DANS L'ADDITION DE L'AMÉNAGEMENT HYDRO-ÉLECTRIQUE DE SIMMENFLUH

par M. HUSSAIN KHAN, ingénieur AMIE, AM ASCE, docteur ès sciences techniques, ancien stagiaire
à la Société Générale pour l'Industrie
et M. DYSLI, ingénieur civil EPUL-SIA, ingénieur à la Société Générale pour l'Industrie, Genève

1. Introduction

En 1960, lors de l'établissement du projet de l'aménagement hydro-électrique de Simmenfluh, nous avons utilisé un ordinateur électronique pour analyser le phénomène d'oscillation en masse dans la chambre d'équilibre. A l'époque, ce moyen était encore peu utilisé en Suisse et relativement onéreux, et nous nous étions posé la question de sa validité. Est-ce que la précision obtenue par le calcul automatique était justifiée ou bien, du fait de l'imprécision des paramètres entrant dans ce calcul, une méthode plus traditionnelle et moins coûteuse était-elle suffisante? Pour pouvoir répondre à cette question, nous avons proposé au maître de l'œuvre, les Simmentaler Kraftwerke AG, de placer, pendant la construction de l'aménagement, quelques prises de pression aux endroits caractéristiques de l'adduction, et de réaliser au moyen de ces dernières

une campagne de mesures après les essais de réception. Notre proposition fut retenue et les prises de pression, les conduites et les puits de mesure placés dans les ouvrages au moment de leur construction.

Le programme primitif de ces essais fut précisé et, complété pendant la réalisation de l'aménagement, en partie grâce à la collaboration du Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne (EPUL). Cette association devait permettre à l'auteur de vérifier certaines hypothèses d'une thèse [1] ayant pour sujet l'étude comparée des effets des simplifications admises habituellement pour le calcul pratique de l'écoulement transitoire dans l'adduction d'un aménagement hydro-électrique.

La direction des essais et leur réalisation furent confiées à la Société Générale pour l'Industrie, et en particulier à son Service de Recherches et d'Essais. Le

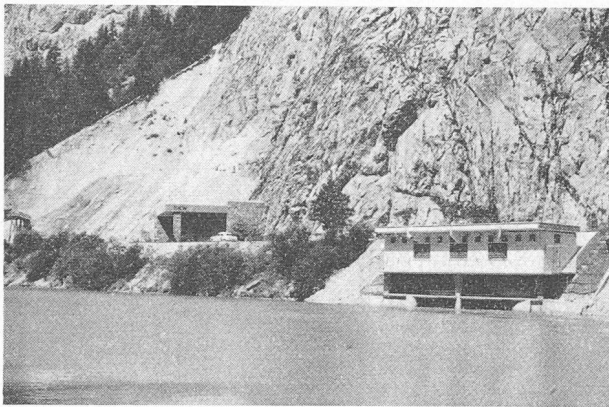


Fig. 1. — Aménagements extérieurs de la centrale de Simmenfluh.

Laboratoire d'hydraulique de l'EPUL est intervenu comme collaborateur et comme conseil.

2. Buts des essais

L'analyse des phénomènes transitoires d'écoulement est, dans la plupart des cas, fort complexe et demande des simplifications importantes au stade de l'étude pratique. Tel est le cas, par exemple, de l'étude des phénomènes de surpression et d'oscillation en masse dans l'adduction d'un aménagement hydro-électrique.

Grâce à sa rapidité de calcul, l'ordinateur électronique permet aujourd'hui une analyse très précise de ces phénomènes. Il permet notamment d'étudier l'oscillation en masse à partir du coup de bélier. On sait que, aujourd'hui encore, les oscillations en masse et le coup de bélier sont étudiés séparément, quoi qu'il soit bien connu que chaque changement du régime d'écoulement, si infime soit-il, est dû aux ondes de pression ou de vitesse. A ce sujet, il est intéressant de signaler que pour le dimensionnement de la chambre d'équilibre, on néglige actuellement le coup de bélier, quoique l'objet principal de celle-ci soit justement de diminuer les surpressions dues à ce phénomène.

Ayant établi un modèle mathématique très complet des phénomènes de surpression et d'oscillation en masse dans l'adduction d'un aménagement hydro-électrique, il nous a paru intéressant de comparer les résultats obtenus par ce moyen avec les résultats de mesures en vraie grandeur.

Pour des régimes transitoires engendrés par les manœuvres du vannage, les essais ont été donc effectués pour mesurer et enregistrer d'une façon continue :

- les surpressions dues au coup de bélier au bas du puits blindé ;
- les oscillations en masse dans la chambre d'équilibre ;
- les pressions dans la galerie d'amenée de part et d'autre de l'insertion de la chambre d'équilibre ;
- le débit de la turbine ;
- l'ouverture du distributeur de la turbine ;
- la vitesse de rotation de la turbine ;
- la puissance du groupe.

Ces mesures avaient pour but principal de déterminer, en ce qui concerne le coup de bélier :

- l'influence des ondes du coup de bélier dans la chambre d'équilibre ;
- l'influence des caractéristiques hydrauliques de la turbine ;

- l'influence de la loi du vannage de la turbine ;
- la transmission des pressions à la galerie d'amenée.

et, en ce qui concerne les oscillations en masse :

- l'influence des pertes de charge dans l'étranglement au bas de la chambre d'équilibre ;
- l'influence des caractéristiques hydrauliques de la turbine.

En ce qui concerne les pertes de charge dans l'étranglement au bas de la chambre d'équilibre, ces essais ont permis également de faire une comparaison entre des résultats évalués théoriquement, des essais sur modèle réduit (effectués par le Laboratoire d'hydraulique de l'EPUL) et les résultats des mesures en vraie grandeur.

A l'aide de ces essais, nous avons pu aussi mesurer les pertes de charge en régime continu dans la galerie d'amenée.

3. Caractéristiques principales de l'aménagement hydro-électrique de Simmenfluh

L'aménagement de Simmenfluh, propriété des Simmentaler Kraftwerke AG, qui se développe sur la rive gauche de la Simme entre le village d'Erlenbach et le défilé du Simmenfluh, comprend :

- un barrage de dérivation avec une prise d'eau ;
- une galerie d'amenée de 6 km environ ;
- une chambre d'équilibre ;
- un puits incliné ;
- une centrale en caverne creusée dans la falaise du Simmenfluh.

Les eaux dérivées à Erlenbach sont restituées dans la retenue de Simmenporte.

Les caractéristiques principales de cet aménagement sont les suivantes :

Superficie du bassin versant	427 km ²
Chute brute	54,80 m
Débit maximum de la Simme à Erlenbach	250 m ³ /s env.
Débit minimum de la Simme à Erlenbach	3 m ³ /s env.
Débit installé	24 m ³ /s env.
Puissance aux bornes de l'alternateur	8500-9000 kW
Production annuelle prévue	50,10 GWh

Toute l'énergie produite est prélevée par le réseau 16 kV des Forces Motrices Bernoises (BKW) avec lequel le groupe marche en parallèle.

Le barrage comprend 4 passes équipées de 3 vannes-segments principales, surmontées d'un clapet et d'une vanne de chasse. Le barrage est dimensionné pour écouler une crue de 400 m³/s avec une vanne fermée.

La galerie d'amenée en rocher est précédée d'un canal couvert de section rectangulaire (4,5 × 1,80 m de dimensions intérieures). Dès le rocher, elle devient circulaire avec un diamètre intérieur de 3,40 m. L'épaisseur de son revêtement varie de 25 à 35 cm suivant la qualité de la roche rencontrée. Au droit de l'insertion de la cheminée d'équilibre dans la galerie d'amenée, son diamètre intérieur est ramené à 3,00 m par un convergent de 5,00 m de longueur. La longueur du canal couvert est de 205 m et celle de la galerie d'amenée, jusqu'à l'insertion de la cheminée d'équilibre, de 5759 m.

La cheminée d'équilibre est à section constante (49,02 m²). Elle est étranglée à sa base par un conduit horizontal de 1,42 m de diamètre et de 2,60 m de longueur, la faisant communiquer avec la galerie d'amenée.

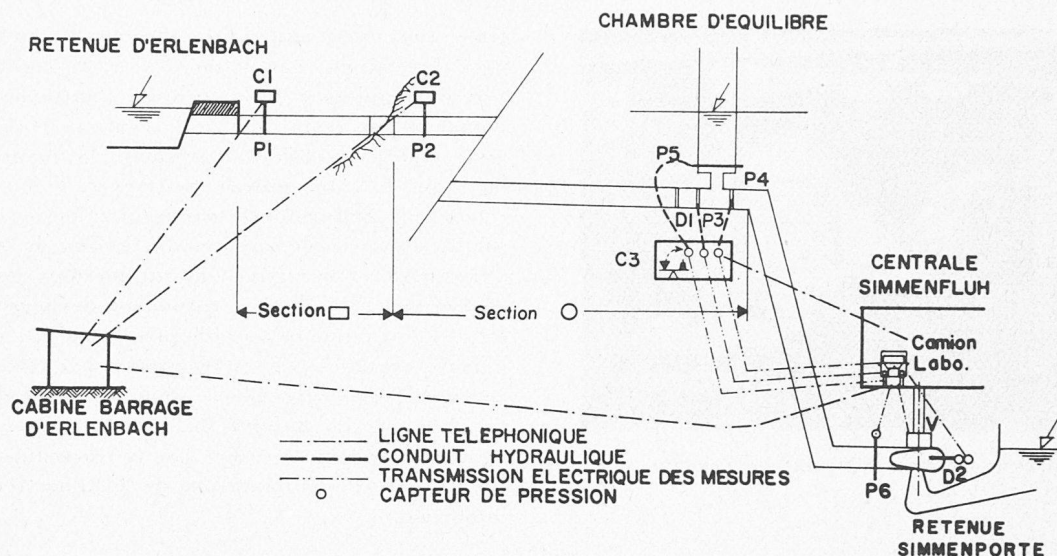


Fig. 2. — Schéma général des dispositifs de mesure.

Le puits incliné a une pente de 80 % et un diamètre intérieur de 3,00 m. Il n'est blindé que dans sa partie inférieure.

La centrale en caverne contient une vanne principale, une turbine Kaplan, un régulateur, un alternateur synchrone triphasé de 11 250 kVA, 16,8 kV et 50 Hz, tournant à 428 tours/mn, un poste de couplage. Quatre lignes aériennes transmettent l'énergie au réseau des BKW.

La centrale de Simmenfluh est télécommandée depuis la centrale d'Erlenbach. Des systèmes d'alarme permettent au personnel de cette centrale d'intervenir rapidement en cas d'incidents.

4. Méthodes et appareillage d'essais

4.1 Prises de pression

Des prises de pression furent disposées en différents points caractéristiques de l'adduction (fig. n° 2). Chaque section de mesure en comportait 4, exceptionnellement 2. Les prises de pression dans les blindages métalliques étaient celles utilisées sur des machines hydrauliques, celles noyées dans une paroi de béton étaient d'un type original, mis au point à l'occasion de ces essais. A l'exception de deux d'entre elles, elles ont toutes donné entière satisfaction.

Les prises de pression étaient reliées par des conduits aux chambres de mesure, reliées elles-mêmes au camion-laboratoire selon le schéma de la figure n° 2.

4.2 Mesure des débits

Le débit est le paramètre déterminant des phénomènes oscillatoires dans une adduction. Il devrait être mesuré par trois méthodes différentes :

- au moyen d'une batterie de moulinet (D1) ;
- par sa relation avec la course du vannage, établie lors des essais de réception de la turbine ;
- par la méthode de Winter-Kennedy, au moyen de deux prises de pression placées sur la bêche spirale de la turbine et d'un capteur de pression différentiel.

Malheureusement, la première méthode, soit la plus précise, a dû être abandonnée car les débris végétaux entraînés dans la galerie d'amenée bloquaient très rapidement les moulinets.

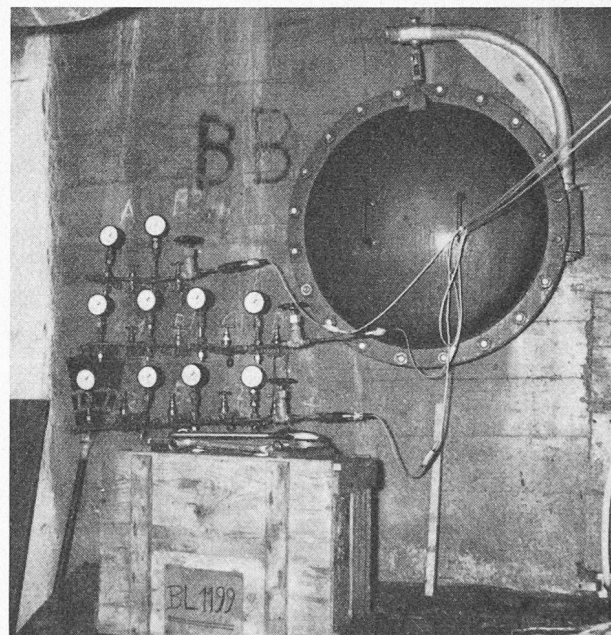


Fig. 3. — Chambre de mesures C3 avec les trois capteurs de pression CP3, CP4 et CP5 et les manomètres de contrôle montés sur chacun des raccords aux prises de pression.

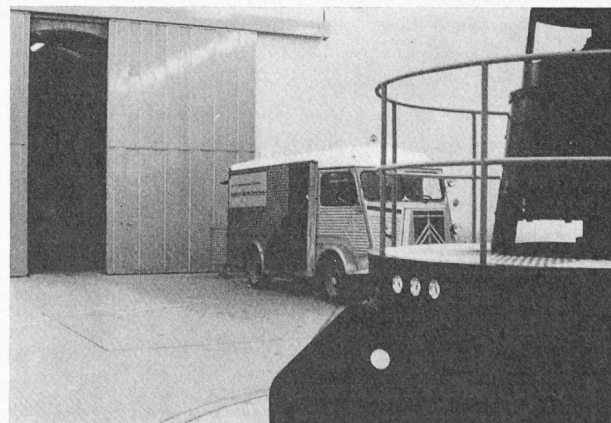


Fig. 4. — Centrale de Simmenfluh avec le camion-laboratoire.

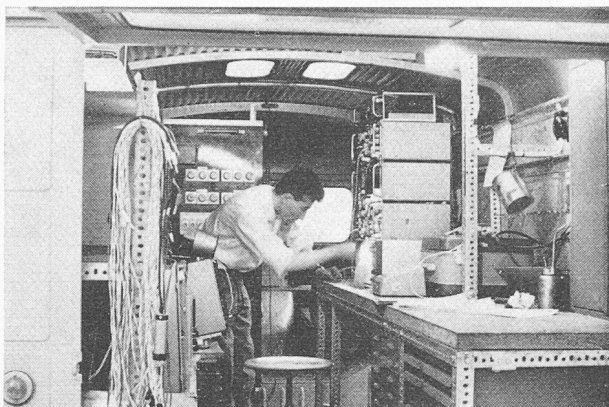


Fig. 5. — Intérieur du camion-laboratoire pendant les essais.

4.3 Mesure des pressions

En P1 et P2, les pressions furent lues directement sur des piézomètres ; en P3, P4, P5 et P6, elles furent mesurées au moyen de capteurs inductifs dynamiques ou au moyen d'une balance de pression. Toutes les mesures effectuées par les capteurs inductifs dynamiques furent transmises par télé-mesure jusqu'au camion-laboratoire placé dans la centrale de Simmenfluh (fig. 4).

Les capteurs de pression ont été étalonnés avant chaque série d'essais au moyen de la balance de pression, car les essais préliminaires nous avaient montré l'absolue nécessité de cet étalonnage après chaque arrêt des appareils de la chaîne d'enregistrement des mesures.

4.4 Mesure de la puissance

Pour quelques essais, la puissance a été mesurée et enregistrée simultanément aux autres valeurs de mesures. Le courant de mesure a été capté en parallèle sur l'ampèremètre de l'excitatrice de l'alternateur. Durant ces mesures, nous avons maintenu constant le $\cos \varphi$.

4.5 Mesure de la vitesse de l'arbre

Pour nous permettre d'étudier un phénomène parasite constaté dans la mesure des débits, nous avons placé un capteur inductif au droit d'une saillie métallique de l'arbre.

4.6 Chaîne d'enregistrement des mesures

Lors des essais en régime transitoire, toutes les grandeurs mesurées ont été continuellement et dynamiquement enregistrées sur un oscillographe à rayons lumineux et à papier photosensible. La largeur du papier était de 20 cm et sa vitesse de déroulement réglable dans une large gamme. Avant l'enregistreur était interposé, sur chaque canal de mesure, un amplificateur à fréquence porteuse modulée. Ces amplificateurs nous permirent de tracer directement aux échelles voulues les valeurs mesurées. Tous les appareils constituant la chaîne de mesure étaient installés à l'intérieur du camion-laboratoire (fig. 4 et 5).

4.7 Organisation des mesures

Lors des mesures relatives aux phénomènes transitoires (coup de bélier et oscillation en masse), tout le personnel d'essais se trouvait à l'intérieur de la cen-

trale. Certaines manœuvres d'essais étaient commandées directement par actions sur le tiroir de distribution du régulateur de la turbine, d'autre par télécommande depuis le tableau de la centrale. Avant chaque essai, nous avons relevé le niveau de la retenue d'Erlenbach sur le transmetteur Rittmeyer, le niveau de la retenue de Simmenporte sur le limnimètre et le $\cos \varphi$ sur les appareils de mesures du tableau de la centrale.

Les mesures en régime continu (mesures des pertes de charge) ont été effectuées au moyen des piézomètres de P1 et P2 et d'une balance de pression placée en P3. Les valeurs mesurées étaient transmises par téléphone à la centrale des mesures placée dans la cabine du barrage d'Erlenbach. La stabilité du régime continu nécessaire à ces mesures était vérifiée par la trace du capteur P5 sur le papier photosensible de l'enregistreur à spot lumineux.

5. Résultats des mesures de pertes de charge dans la galerie d'amenée

Les mesures de pertes de charge dans la galerie d'amenée ont été effectuées pour plusieurs débits différents variant de 5 à 24,3 m³/s. Les résultats obtenus ont été un peu décevants ; nous espérions, en effet, une précision de l'ordre de 2 % sur le coefficient de perte de charge et celle obtenue ne fut que de 5 %. Cette différence est due en partie à un manque de précision dans la mesure des débits qui intervient à la puissance 1 dans le calcul du coefficient alors que la différence de charge intervient seulement à la puissance $\frac{1}{2}$.

Après les essais, une étude un peu approfondie de la question nous a un peu rassurés, elle a montré que le maximum de précision dans la mesure des débits, en procédant avec plusieurs méthodes différentes, ne peut descendre actuellement en dessous de 2 %.

La valeur du coefficient de perte de charge déterminé d'après la formule de Strickler a été de

$$K_s = 87,1 \pm 4,1.$$

Elle montre que l'hypothèse admise pour le calcul de l'oscillation en masse dans une adduction quant aux valeurs limites de K_s (70 et 90) est un peu pessimiste. Lorsque l'on a affaire à une galerie entièrement revêtue, il semble que l'on pourrait réduire cette marge.

6. Résultats des mesures du coup de bélier et des oscillations en masse

Nous allons décrire d'abord succinctement les hypothèses de base des méthodes mathématiques que nous avons utilisées pour le calcul du coup de bélier et des oscillations en masse. Nous n'entrerons pas dans les détails qui, d'ailleurs, sont le sujet de la thèse [1] citée précédemment. Ensuite, nous allons comparer les résultats des calculs faits, en admettant différentes hypothèses simplificatrices, avec les résultats des mesures effectuées pour cinq manœuvres de vannage différentes, choisies parmi les quelque quarante manœuvres effectuées au total. Enfin, nous tirerons quelques conclusions générales de ces comparaisons.

6.1 Calcul du coup de bélier

La méthode utilisée permet de tenir compte :

- du coup de bélier dans tous les organes de l'adduction, y compris la chambre d'équilibre et le tuyau de raccordement entre celle-ci et la galerie d'amenée ;
- de l'énergie cinétique de l'eau, ainsi que de la variation de son module d'élasticité avec la pression (équation non linéaire du coup de bélier) ;
- de la variation du niveau du plan d'eau dans la chambre d'équilibre ;
- des pertes de charge dues au frottement le long des parois des conduites, pertes qui peuvent être évaluées à l'aide d'un coefficient variable, en fonction du nombre de Reynolds, ou par un coefficient constant. Ces pertes sont admises concentrées en un certain nombre de diaphragmes fictifs ;
- des pertes de charge dans le raccordement en té, évaluées à l'aide de coefficients constants ou variables ;
- des caractéristiques hydrauliques de la turbine ;
- des lois de manœuvre.

Les équations régissant ces phénomènes ont été établies d'après le principe de Bergeron-Schnyder, soit en imaginant dans chaque tronçon de l'adduction deux observateurs partant des extrémités et se déplaçant en sens inverse à une vitesse égale à la célérité de l'onde du coup de bélier.

Le système d'équation ainsi déterminé a été traduit en langage machine pour être résolu au moyen de l'ordinateur.

6.2 Calcul de l'oscillation en masse

Le modèle mathématique de l'oscillation en masse permet de tenir compte :

- des pertes de charge dans le raccordement en té ;
- des pertes de charge dues au frottement évaluées à l'aide de la formule de Darcy, avec un coefficient variable en fonction du nombre de Reynolds ;
- des lois de manœuvre ;
- des caractéristiques hydrauliques de la turbine.

Les hypothèses simplificatrices admises sont les suivantes :

- les conduites sont indéformables ;
- l'eau est admise comme incompressible ;
- l'inertie de l'eau dans la chambre d'équilibre et le puits incliné est négligeable ;
- la vitesse de rotation du groupe reste constante.

Les relations constituant le modèle découlent, entre autres, de la loi de Newton, de la loi de continuité et de la loi empirique des pertes de charge.

Le programme de calcul établi pour l'ordinateur IBM 7040 permet de déterminer pour une chambre d'équilibre à section constante ou variable, simple ou munie d'un étranglement sous forme d'un diaphragme ou sous forme d'un raccordement en té :

- les oscillations en masse dans la chambre, à la suite d'une manœuvre simple ou combinée du vannage sans réglage ;
- les oscillations en masse dans la chambre à la suite d'une manœuvre simple instantanée avec réglage à puissance constante.

Il donne aussi la possibilité :

- de faire varier le coefficient de pertes de charge dues au frottement, en fonction du nombre de Reynolds. Dans ce cas, la loi de variation de ce coefficient est donnée sous forme d'un tableau ;
- de calculer les différents coefficients qui sont utilisés pour les calculs des pertes de charge, dues aux frottements et variations de section dans les différentes parties de l'adduction ;
- de calculer, dans le cas d'une chambre d'équilibre à étranglement sous forme d'un raccordement en té, les coefficients de pertes de charge dans le raccordement ;

- de tenir compte des caractéristiques hydrauliques de la turbine. Dans le cas d'une turbine à réaction, un tableau de débit est donné, en fonction de l'ouverture du vannage ;
- de déterminer la valeur de l'ouverture initiale du régime permanent, les valeurs de chute brute (qui est admise constante pendant l'analyse) et le débit initial étant fixé à l'avance ;
- de tenir compte des lois de fermeture et d'ouverture du vannage, données sous forme d'un tableau des valeurs relatives de l'ouverture du vannage (rapportées à la valeur maximale de l'ouverture pour la manœuvre examinée), en fonction du temps de la manœuvre en valeur relative (rapportées au temps total de la manœuvre examinée) ;
- d'utiliser un pas variable d'intégration, les valeurs de Δt étant données sous forme d'un tableau en fonction du niveau d'eau dans la chambre d'équilibre.

6.3 Caractéristiques dynamiques de l'aménagement de Simmenfluh

Les valeurs théoriques de la célérité d'onde du coup de bélier ont été obtenues au moyen de la formule de Jaeger. Elles sont les suivantes :

Galerie d'amenée :	$a = 1230$ m/s
Cheminée d'équilibre :	$a' = 1220$ m/s
Puits blindé :	$a'' = 1310$ m/s

D'après les mesures (par exemple les résultats de la manœuvre n° 3, fig. 10), on constate que la période du coup de bélier dans le puits blindé est de 0,33 s ; on détermine, ainsi, une célérité de 1140 m/s. Dans la galerie d'amenée, le temps de parcours mesuré fut de 5,12 secondes, d'où il ressort une vitesse de l'onde de 1120 m/s. Nous voyons ainsi que les valeurs théoriques sont toutes plus élevées que celles obtenues d'après les mesures. Comme la mesure de la célérité dans le puits fut la plus précise, nous l'avons admise comme base de calcul du facteur de réduction entre les valeurs théoriques et les valeurs admises pour le calcul.

Les pertes de charge dans la galerie d'amenée, dans le puits, dans l'étranglement au bas de la chambre d'équilibre et dans le raccordement en té mesurées pendant les essais nous ont permis de déterminer les différents coefficients des lois empiriques de perte de charge intervenant dans les équations. Les pertes de charge dans l'étranglement et dans le raccordement en té ont été évaluées soit à l'aide de coefficients globaux constants (calculs usuels) pour l'écoulement sortant de la chambre et pour l'écoulement entrant dans la chambre, soit à l'aide de coefficients variables pour ce qui est des pertes de charge dans le raccordement en té (fig. 6). Elles ont été encore comparées aux résultats d'un essai sur modèle de la chambre d'équilibre, exécuté par le laboratoire d'hydraulique de l'EPUL lors du projet de l'adduction.

Pour déterminer les paramètres hydrauliques d'une turbine, on mesure les valeurs du débit en fixant d'abord une ouverture du vannage, ensuite en faisant varier soit la chute, soit la vitesse de rotation du groupe. L'accumulation d'Erlenbach est créée par un barrage en rivière à vannes ; il n'était donc pas possible de faire varier de façon appréciable la charge à la turbine. Il n'était pas non plus possible de faire varier les vitesses de rotation du groupe sans une résistance hydraulique capable d'absorber la puissance de la machine. Pour ces raisons, les courbes caractéristiques de la turbine n'ont pu être établies. Nous avons pu, toutefois, déterminer

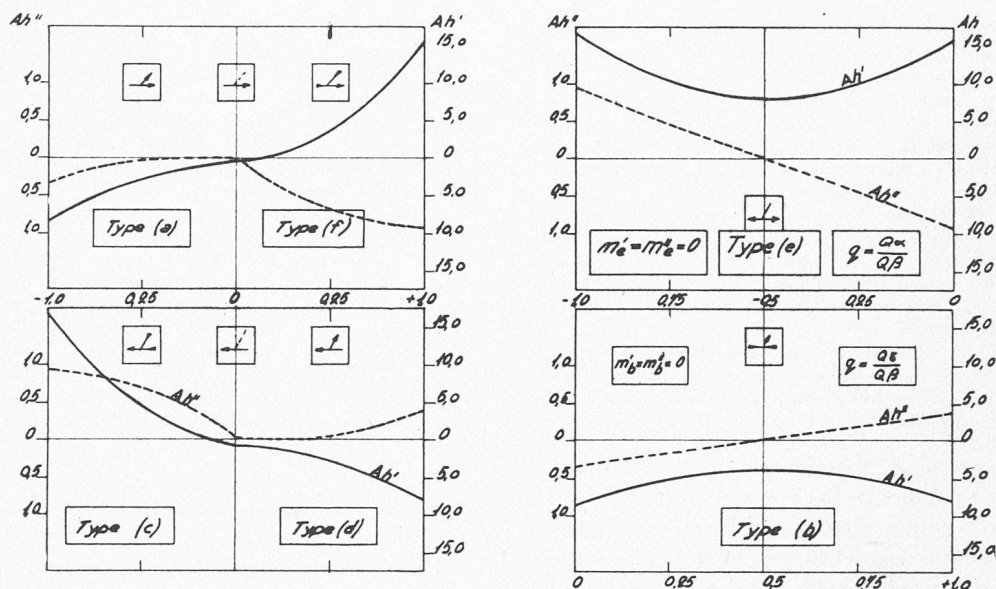
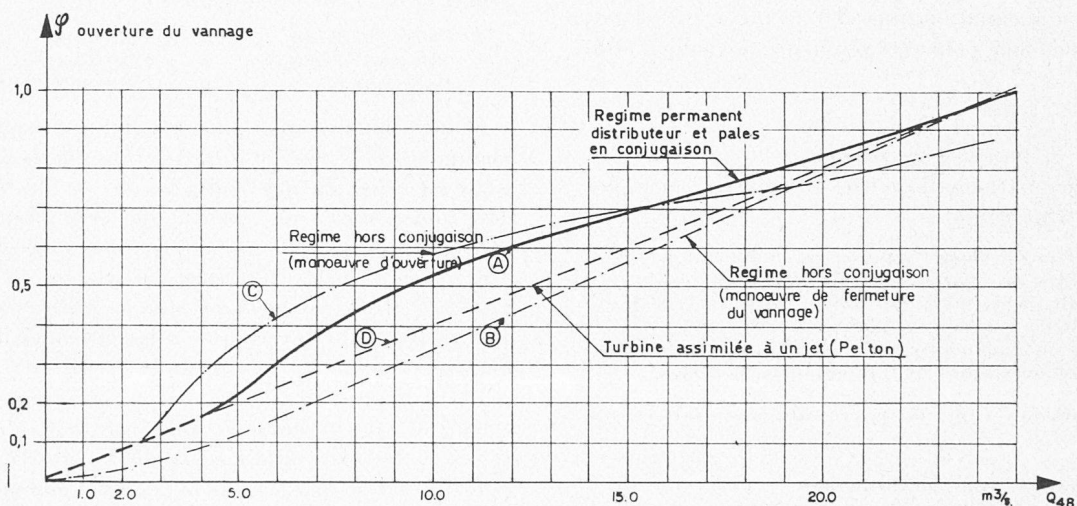


Fig. 6. — Pertes de charge dans le raccordement en té de Simmenfluh.



$$Q = Q_{48} \left[\frac{HN}{48} \right]^{1/2} \quad HN = \text{chute nette}$$

Fig. 7. — Relation débit/ouverture à la turbine pour une chute nette de 48 m.

une courbe ouverture-vannage/débit lors des essais de réception de la turbine à l'aide des moulinets placés dans la galerie d'amenée (moulinets qui ne fonctionnent plus lors des essais de plus longue durée) (fig. 7). Cette courbe est valable pour la conjugaison ouverture distributeur - ouverture roue de la figure 8. En utilisant la courbe du régime permanent (courbe A de la fig. 7) et en admettant le débit proportionnel à la racine carrée de la chute nette, nous avons pu établir la relation entre le débit, l'ouverture du vannage et la chute nette. En régime transitoire, cette relation n'est plus valable, car il y a décalage de temps entre les mouvements des pales et les mouvements du distributeur de la turbine Kaplan. Les relations entre le débit et l'ouverture du vannage en régime hors conjugaison sont données par les courbes B et C de la figure 7. Ces courbes nous permirent de déterminer les relations entre le débit, l'ouverture du vannage et la chute nette pour le cas d'une manœuvre de fermeture et pour le cas d'une manœuvre d'ouverture.

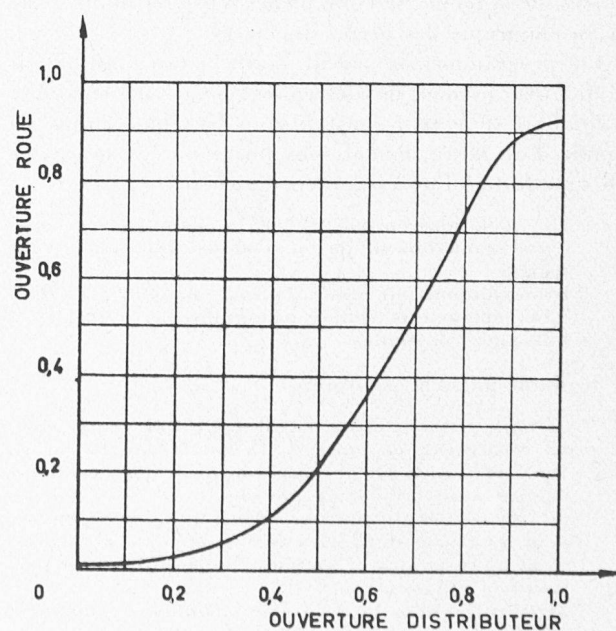


Fig. 8. — Loi de conjugaison distributeur-roue.

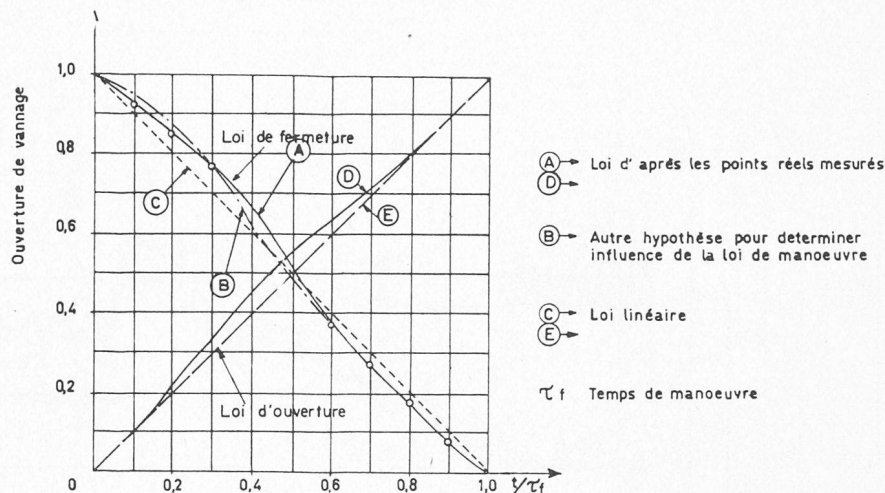


Fig. 9. — Lois de manoeuvre du vannage.

L'ouverture du vannage, soit la course du servomoteur du vannage, a été mesurée à l'aide d'un potentiomètre (V). Les courbes A et D de la figure 9 représentent les lois réelles des manoeuvres de fermeture et d'ouverture du vannage de la turbine de Simmenfluh. Les droites C et E représentent les lois linéaires admises habituellement.

6.4 Manoeuvre n° 3 — Etude du coup de bélier

La manoeuvre n° 3 est une fermeture totale, en 4,2 secondes, à partir d'une ouverture initiale de 0,92, le groupe restant en parallèle pendant la manoeuvre. Les résultats des mesures et les calculs sont donnés à la figure 10.

Pour les calculs d'après la méthode du coup de bélier d'onde, les hypothèses suivantes ont été admises :

- 1) Le phénomène du coup de bélier est négligeable dans le tuyau de raccordement (le temps de parcours de l'onde du coup de bélier dans ce raccordement est de 0,00225 seconde !). Un calcul, qui en tiendrait compte, ne serait utile que pour une manoeuvre hypothétique en 0,0045 seconde.
- 2) La variation du coefficient de pertes de charge dans le raccordement en té est négligeable. En valeur relative du système de MM. Calame et Gaden, l'énergie cinétique de l'eau dans le convergent à l'insertion de la chambre d'équilibre et la perte de charge totale au travers de l'étranglement se présentent comme suit :

$$e_o = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_o}{f_v} \right)^2 \frac{1}{Z^*} = \frac{1}{19,62} \left(\frac{22,5}{7,08} \right)^2 \frac{1}{28,19} = 0,018 ;$$

$$r_o = \frac{R_o}{Z^*} = \frac{13,1}{28,19} = 0,465$$

où

$$Z^* = Q_o \sqrt{\frac{L}{g F F'}}$$

R_o = pertes de charge dans l'étranglement correspondant au débit Q_o ;

Q_o = valeur initiale du débit en régime permanent ;

f_v = section du convergent dans la galerie d'amenée ;

L = longueur de la galerie d'amenée ;

F = section de la galerie d'amenée ;

F' = section de la chambre d'équilibre.

L'ordre de grandeur de l'erreur que l'on commet en négligeant la variation du coefficient est donnée par la formule : [4 page 150] :

$$\epsilon = 128 e_o (r_o)^5 = 128 \cdot 0,018 (0,465)^5 = 0,05 \%.$$

Cette erreur est négligeable dans le cas de Simmenfluh.

Nous avons effectué plusieurs analyses dans le but d'examiner, dans le cas particulier de Simmenfluh, l'influence de quelques hypothèses simplificatrices sur les pressions dans l'adduction pendant le régime transitoire.

Nous avons tâché de déterminer :

- l'influence du phénomène du coup de bélier dans la chambre d'équilibre ;
- l'influence des caractéristiques hydrauliques de la turbine.

Pour évaluer l'erreur dans le calcul des pressions transmises à la galerie d'amenée, d'après la méthode des oscillations en masse, nous avons admis que :

- l'inertie de l'eau dans la conduite forcée, ainsi que dans la chambre d'équilibre, est négligeable ;
- la variation du coefficient de perte de charge dans le raccordement en té est négligeable.

Une comparaison des résultats des analyses nos 1 et 2 montre que l'influence du phénomène du coup de bélier dans la chambre d'équilibre est négligeable. On constate une augmentation de pression aux capteurs CP6, CP3 et CP4 de 20 à 50 cm d'après l'analyse n° 1. Il est à remarquer que les résultats de l'analyse n° 1 s'accordent mieux avec les résultats des mesures.

En admettant les caractéristiques hydrauliques de la turbine en régime hors conjugaison, on obtient des résultats concordant avec les mesures, comme le montre la courbe 2 de la figure 10. La pression maximale au bas du puits blindé est de 699,7 m.s.M. d'après les calculs et de 699,6 m.s.M. d'après les mesures.

La courbe 3 de la figure 10 a été obtenue en utilisant les caractéristiques du régime permanent. On constate que les pressions calculées au bas du puits incliné sont plus importantes que celles mesurées pendant la première partie de la manoeuvre et deviennent plus petites vers la fin. Ceci est dû au retard du mouvement des pales sur le mouvement du distributeur.

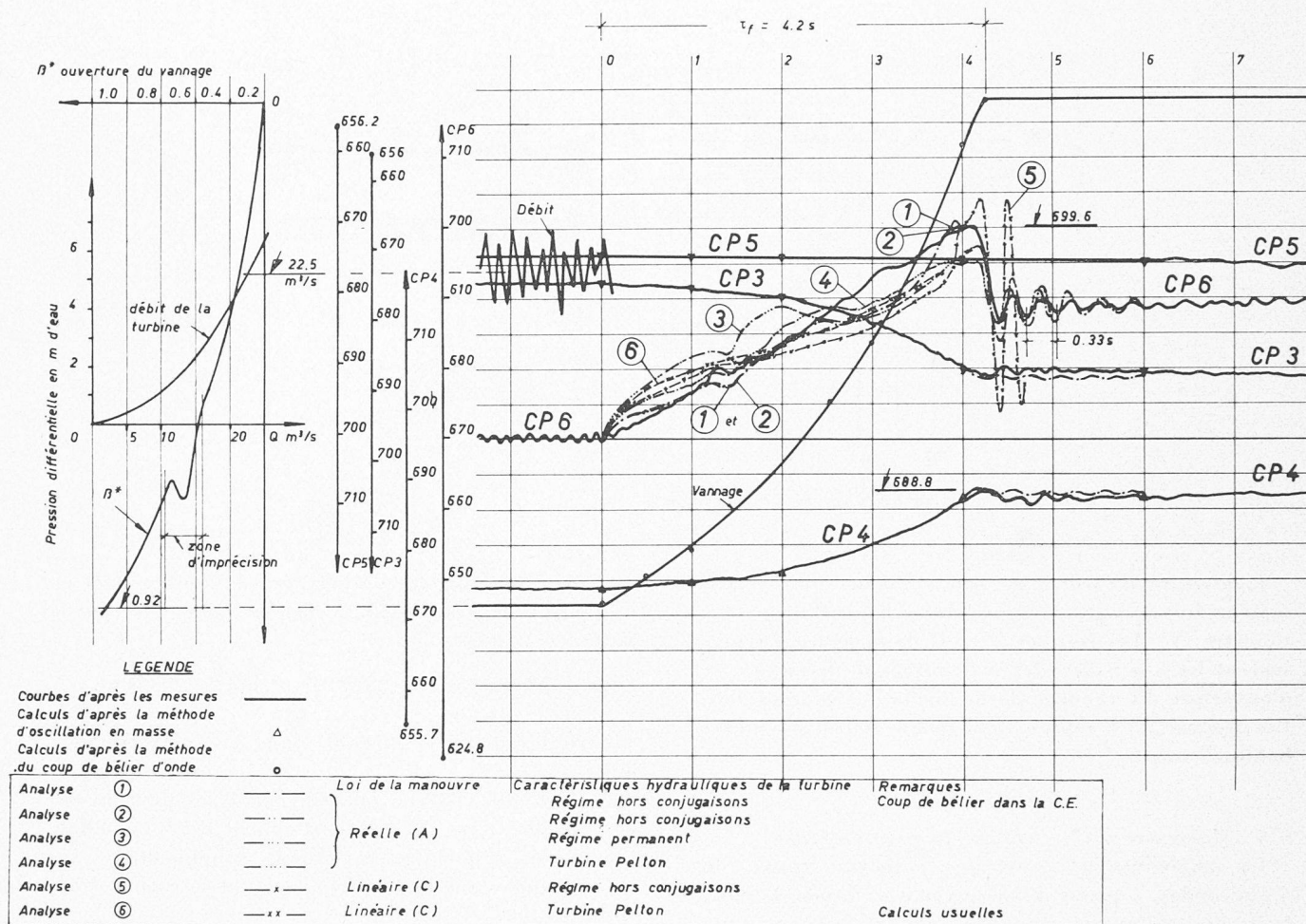


Fig. 10. — Analyse de la manœuvre n° 3.

La pression maximale calculée au bas du puits blindé étant de 694,8 m.s.M., l'erreur sur la valeur de la surpression est de :

$$\varepsilon = \frac{699,6 - 694,8}{699,6 - 682,3} 100 \cong 28 \, \%.$$

En assimilant la turbine à un jet, et en utilisant une équation simple du débit (courbe D, fig. 7), on détermine la courbe 4 de la figure 10. La pression maximale calculée étant la même que pour l'analyse 3, l'erreur sur la valeur de la surpression maximale, au bas du puits incliné, est aussi de 28 % et agit dans le sens opposé à la sécurité.

Sur la loi du vannage, on peut faire les remarques suivantes : on constate qu'en utilisant les caractéristiques hydrauliques hors conjugaison de la turbine et en admettant une loi linéaire du vannage, on obtient une pression maximale plus grande que celle mesurée. L'erreur sur la valeur de la surpression au bas du puits incliné est de l'ordre de 20 %.

Une comparaison entre la courbe 6 et l'oscillation mesurée montre que si l'on admet à la fois les deux hypothèses de la fermeture linéaire et de la turbine assimilée à un jet, on commet une erreur dans le sens opposé à la sécurité ; comme la pression maximale calculée est de 697,9 m.s.M., l'erreur sur la valeur de surpression maximale est de 15 % environ.

Nous avons effectué une autre analyse en admettant la loi de la manœuvre de la courbe B (fig. 9) et en assimilant la turbine à un jet. La valeur de pression maximale, au bas du puits incliné, a été alors de 695,1 m.s.M.

La courbe de mesure et les résultats des calculs (analyse 2), d'après la méthode du coup de bélier, montrent que la pression dans la galerie d'amenée à l'insertion de la chambre d'équilibre oscille autour d'une valeur moyenne à la suite de la fermeture totale du vannage. On constate que, dans le cas de Simmenfluh, les oscillations ne sont pas très importantes, ceci pour les raisons suivantes :

- 1) le coup de bélier est négligeable dans le tuyau de raccordement et la chambre d'équilibre ;
- 2) le puits incliné étant court, le volume d'eau refoulé par celui-ci dans la chambre d'équilibre, à la suite de la fermeture totale du vannage, n'est pas important.

La méthode des oscillations en masse ne donne qu'une valeur moyenne des pressions transmises à la galerie d'amenée. Cette valeur, d'après les calculs, étant de 687,78 m.s.M., l'erreur sur la valeur de la surpression maximale transmise à la galerie d'amenée est de :

$$\varepsilon = \frac{688,8 - 687,78}{688,8 - 682,3} 100 \cong 15 \, \%.$$

(A suivre.)