Calcul de la cheminée à étranglement de la chute Isère-Arc

Calculation of the Isère-Arc restricted orifice surge tank

PAR M. BOUVARD ET J. MOLBERT

INGÉNIEURS A L'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE (R.E.H. ALPES II)

Le choix d'une cheminée à étranglement et à chambres d'expansion supérieures, compte tenu des dispositions et des caractéristiques hydrauliques, d'une part, des problèmes de Génie Civil, d'autre part. — Calcul de la cheminée (puits, étranglement et chambres d'expansion) en fonction des conditions d'exploitation de la centrale et de la sécurité des ouvrages. — Adoption d'un puits antibélier pour protéger, contre les surpressions dues à l'étranglement, le tronçon en béton armé des ouvrages d'aménée. — Calcul des caractéristiques et de l'implantation de ce puits. — Etude du comportement des ouvrages dans un certain nombre de cas de fonctionnement.

Choice of a restricted orifice surge tank with upper expansion chambers, account being taken of the layout and hydraulic characteristics of the structures and of the civil engineering problems.—Calculation of the surge tank (well, orifice and expansion chambers) as a function of the working conditions of the power plant and the safety of the structures.—Adoption of an anti-waterhammer well for protection of the length of reinforced concrete pipe of the intake structures against pressure surges resulting from the orifice.—Calculation of the characteristics and position of this well.—Study of the behaviour of the structures in a certain number of operational cases.

L'aménagement d'Isère-Arc utilise les eaux de l'Isère captées en aval de Moutiers et les restitue dans l'Arc au voisinage d'Aigueblanche, sous une

chute de 150 m; le débit maximum dérivé est de 100 m³/s.

I. — GÉNÉRALITÉS

1° Description des ouvrages

Nous allons décrire brièvement différentes parties de cette chute en détaillant certains points pouvant avoir de l'influence sur le projet de cheminée d'équilibre.

Le barrage et la prise d'eau sont placés au lieu dit « Les Echelles d'Annibal » à l'extrémité aval du défilé précédant la localité d'Aigueblanche.

Le barrage est du type poids; le niveau normal étant fixé à la cote 471, le volume de la retenue est de 400.000 m³ environ jusqu'au niveau minimum prévu à la cote 466; cette rete-

nue pourra être utilisée pour compenser ou recaler les pointes de débit des usines utilisant les retenues amont, actuellement Tignes et ultérieurement Champagny. Il n'est cependant pas exclu que l'on utilise également comme réserve la galerie d'aménée dont la capacité est voisine de celle de la retenue.

La dérivation en charge comporte plusieurs parties :

a) Un tronçon de conduite en béton armé de 6,40 m de diamètre (32 m²) et 2.600 m de longueur environ; la charge sur cette conduite varie de 10 à 18 m, mais nous signalons, et cette

considération est importante, que le prix croît très vite en fonction de la pression;

b) On entre ensuite en souterrain au lieu dit l'Etrat dans du terrain constitué par du schiste du Lias. Ce rocher est de bonne qualité quoique la couverture soit relativement faible; la section reste circulaire, de $\varnothing$ 6,40 m;

c) Après une courte traversée dans le trias de la Léchère, sur une centaine de mètres environ, la galerie entre dans le cristallin qu'elle ne quitte plus jusqu'à la fenêtre de Notre-Dame-de-Briançon qui constitue la dernière attaque côté Isère; la section de 32 m² est alors en fer à cheval;

d) Enfin, le massif montagneux séparant l'Isère de l'Arc est traversé par un tronçon sans fenêtre de 11 km de long, tout entier situé dans le cristallin, sauf quelques passages de courte longueur prévus dans le trias. Le terrain est, en général,

bon, mais il existe certains tronçons où le rocher est plus mauvais et nécessite un revêtement très sérieux. C'est à l'aval de ce tronçon, côté Arc, que se trouve placée la cheminée d'équilibre souterraine.

La conduite forcée est constituée par deux conduites indépendantes souterraines et blindées, de 3,70 m de diamètre, précédées de robinets papillon à fermeture automatique.

La centrale est souterraine; elle comporte quatre groupes Francis à axe vertical turbinant chacun 25 m³/s; chaque groupe sera relié à un transformateur, mais l'énergie sera évacuée par deux lignes indépendantes à 150.000 Volts, d'où la faible probabilité de déclenchement simultané de tous les groupes.

Le canal de fuite, précédé d'un court tronçon en galerie, est à écoulement libre, creusé dans les alluvions de l'Arc sur la plus grande partie de son tracé.

FIG. 1

Le tracé général des canalisations est reporté sur la figure 1.

L'énergie, emmagasinée du fait de la vitesse de l'eau dans l'ouvrage d'amenée, atteint une valeur considérable et la cheminée d'équilibre correspondante était, de toutes façons, destinée à recevoir des dimensions importantes surtout si l'on voulait, eu égard à la hauteur de chute, limiter la montée de l'eau à une valeur acceptable pour en diminuer les répercussions sur le dimensionnement des canalisations et sur les conditions de régulation.

2^e Étude des pertes de charge

On connaît le rôle que jouent les pertes de charge lors de l'oscillation en masse dans un système galerie-cheminée d'équilibre; aussi, nous avons essayé d'approcher le plus possible le résultat probable en faisant procéder à un essai expérimental, dans la galerie d'amenée de Cordéac, de caractéristiques assez voisines (diamètre 5,40 m) et dont les conditions d'exécution sont sensiblement identiques (emploi systématique de coffrages métalliques). Le coefficient de

rugosité exprimé par la formule de STRICKLER a été trouvé égal à 75; malgré cette détermination expérimentale, nous avons gardé une fourchette assez importante entre les pertes de charge

admises à la montée et à la descente, soit 14 et 20 m, ce qui correspond, compte tenu des pertes singulières, à des coefficients de perte de charge (STRICKLER), compris entre 71 et 80.

II. — CHOIX DU TYPE DE CHEMINÉE

La solution en chambres d'expansion, supérieure et inférieure, sans étranglement, ne fut pas examinée en détail. On sait, en effet, que ce type d'ouvrage est intéressant quand le puits central peut être de dimensions réduites et quand les chambres d'expansion peuvent être calées haut et être très plates; ce n'était pas le cas à Randens, étant donné les dimensions qu'on aurait dû donner au puits central pour, au moins, ne pas être trop en dessous de la section de Thomas. D'autre part, des chambres d'expansion très plates auraient été d'une longueur démesurée, incompatible avec les conditions de remplissage rapide au cours d'une fermeture.

Le type différentiel pouvait, à première vue, paraître séduisant, étant donné la dissymétrie entre la valeur optimum de la perte de charge à créer par l'étranglement à la fermeture et à l'ouverture, beaucoup plus partielle. Il est, en effet, possible dans ce cas de dimensionner l'étranglement du grand puits pour l'ouverture, la communication étant réalisée lors du déclenchement par le puits différentiel. Une solution séduisante pouvait même consister à prévoir le petit puits directement dans le prolongement des conduites forcées souterraines. Le génie civil restait cependant assez compliqué du fait des difficultés provenant des robinets de tête de conduite. En outre, le puits différentiel était assez sensible aux fausses manœuvres, une ouverture trop importante pouvant notamment provoquer sa vidange rapide, donc une grosse entrée d'air dans les conduites.

Restaient les solutions déversantes et à étranglement, pour lesquelles différents projets de chaque type furent établis. Ils servirent de base à des études comparatives assez poussées. Au point de vue prix, la comparaison était rendue assez aléatoire en raison de l'estimation incertaine concernant, d'une part, la répercussion d'une augmentation de charge sur le prix des ouvrages d'amenée, d'autre part, le coût de l'ouvrage de dissipation d'énergie, pour lequel il n'existait pas de précédent bien comparable. En définitive, nous avons conservé la solution à étranglement, qui nous semblait plus sûre.

La perte de charge de l'étranglement n'était pas encore strictement fixée; sa valeur maximum à la fermeture était donnée par l'étranglement optimum créant à la fermeture une perte de

charge maximum pour le plein débit égal à la montée maximum au-dessus du niveau statique augmenté des pertes de charge dans la galerie, soit 31 m environ.

Si l'on veut satisfaire sans variation de diamètre aux conditions d'ouverture, on est conduit à une section de 200 m², correspondant à un diamètre de 16 m, donc à une dimension de puits qui, tout en étant respectable, pouvait être exécutée sans difficulté spéciale. Nous avons, en effet, considéré comme exécutable un puits de diamètres 15-17 m, mais nous avons admis qu'au-delà il serait nécessaire de compléter la section du puits par des galeries horizontales donnant la surface désirée. Ce sont donc les conditions relatives à l'ouverture qui ont, en définitive, donné la dimension minimum du puits central. D'ailleurs, il est possible que la centrale de Randens débite en hiver sur un réseau dont la puissance ne sera pas beaucoup supérieure au triple de sa puissance propre, et le fait que d'autres raisons nous conduisent à adopter une section double de celle de Thomas (95 m²) a l'avantage d'éviter toute discussion au sujet de la stabilité des petites oscillations.

Type d'étranglement. — Etant donné la dissymétrie entre les conditions d'ouverture et de fermeture, il est bon de donner à l'étranglement de la cheminée la dissymétrie maximum; d'autre part, pour la commodité des travaux, il est préférable de déjeter la cheminée par rapport à la galerie car la grande longueur du tronçon sans fenêtre nécessitera pendant toute la durée des travaux une circulation intense qu'il n'est pas possible d'interrompre en excavant un puits à la calotte de la galerie d'amenée. Pour augmenter au maximum les possibilités d'abaissement du niveau dans la cheminée, une disposition un peu spéciale de l'étranglement a été proposée; elle est schématiquement représentée sur la figure 2. Elle présente la particularité de mettre la galerie en dépression, uniquement en régime transitoire, ce qui ne semble pas présenter d'inconvénient; il parut indispensable d'essayer ce système d'étranglement sur modèle réduit pour en vérifier l'efficacité et la dissymétrie; cette étude fut réalisée au Laboratoire National d'Hydraulique à Chatou. Cependant, cet étranglement présente un certain inconvé-

FIG. 2

nient vis-à-vis des bulles d'air entraînées par l'eau dans la galerie; ces bulles ne peuvent pas s'échapper au droit de la cheminée et risquent à la longue de former, à cet endroit-là (change-

ment de pente) une bulle importante avec tous les inconvénients qui peuvent en résulter; c'est pourquoi il a été prévu un dispositif spécial constituant un désaérateur (fig. 2).

III. — CALCUL DE LA CHEMINÉE A ÉTRANGLEMENT

Comme on vient de le voir, il avait été décidé que la cheminée d'équilibre serait formée d'un puits central de 15 à 17 m de diamètre sur lequel serait branché un certain nombre de chambres d'expansion (fig. 3), de façon que la

FIG. 3

section résultante soit celle que donnerait le calcul (ainsi, un calcul grossier pour une cheminée à étranglement optimum donne une section de l'ordre de 450 m² qui équivalait à un diamètre de 24 m). D'autre part, cette disposition permet, sans difficulté, de construire une cheminée

d'équilibre dont la section varie d'une manière presque continue en fonction de la cote, ce qui permet, comme nous le verrons plus loin, de conserver une valeur constante à la pression au droit de la cheminée d'équilibre, au cours d'une manœuvre de fermeture.

La forme de la cheminée étant dégrossie, le calcul a été conduit de la manière suivante :

Le diamètre du puits a été calculé pour satisfaire aux conditions d'ouverture, en admettant que la partie basse de la cheminée d'équilibre (celle qui est le plus souvent en pression) serait constituée de la manière la plus simple par un puits cylindrique sans chambre d'expansion. Les chambres d'expansion de la partie supérieure ont été calculées par la méthode directe relative à la condition de fermeture totale instantanée et permettent ainsi de serrer, le plus près possible, la forme idéale qui n'est, en général, pas celle d'un cylindre. Notons en passant que la partie basse de la cheminée d'équilibre n'est pas définie avec la même exactitude que la partie haute puisque les conditions d'ouverture sont beaucoup moins bien définies que les conditions de fermeture.

1° Calcul à l'ouverture — Diamètre du puits

Si les conditions de fermeture sont bien définies, les conditions d'ouverture ont fait l'objet d'une étude spéciale; il ne pouvait être question d'admettre une ouverture complète instantanée, qui aurait conduit soit à surdimensionner considérablement la base de la cheminée d'équilibre, soit à caler la galerie à une cote trop basse (ce qui aurait eu pour conséquence de trop la surcharger). La situation de cet aménagement n'est pas telle qu'il soit justifiable d'une pareille mesure. La réserve est de faible importance et l'usine doit surtout pouvoir turbiner les lâchures d'hiver du barrage de Tignes, dont l'usine principale Malgovert est équipée à 50 m³/s.

En définitive, la cheminée d'équilibre doit permettre la mise en marche rapide de chacun des quatre groupes et, en particulier, la mise en marche du quatrième et dernier groupe. Cette condition étant remplie, il est bien évident que la cheminée d'équilibre permettra, à plus forte raison, l'ouverture des trois premiers (séparément). Nous avons également calculé la cheminée d'équilibre de manière qu'elle permette la mise en marche des quatre groupes à la pleine charge en 8 mn, ce qui semble conduire à des normes d'exploitation correctes. Or, au moment où nous faisons cette étude, le modèle réduit de l'étranglement était encore à l'étude et nous ne connaissions pas exactement ses caractéristiques.

Cependant, il faut remarquer qu'une ouverture de 75 à 100 % n'intéresse que le quart du débit total, donc que l'étranglement crée une dépression maximum qui n'est que le 1/16 de la dépression qu'il créerait pour le débit total. Autrement dit, pour cette manœuvre particulière, son influence est faible et pratiquement négligeable. Il en est de même d'ailleurs pour l'ouverture progressive des quatre groupes en 8 mn qui ne fait intervenir en travers de l'étranglement que des débits inférieurs à 25 m³/s. Donc, pratiquement, il n'était pas indispensable de connaître exactement les possibilités de l'étranglement.

En définitive, nous avons pris un puits de Ø 16 m permettant l'ouverture de 75 à 100 % et l'ouverture progressive en 8 mn dans le cas le plus défavorable où l'étranglement n'aurait donné que 30 m de perte de charge pour $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ (dissymétrie de l'étranglement égale à 2, ce qui pouvait déjà être considéré comme un minimum). Ces conditions auraient donc été, à plus forte raison, remplies si l'étranglement avait donné une perte de charge supérieure à 30 m, comme les résultats partiels de l'essai sur modèle nous le laissaient espérer.

La puissance de l'étranglement conserve cependant un énorme intérêt pour les manœuvres d'ouverture de 0 à $x\%$ qui sont particulièrement intéressantes. En effet, après un déclenchement général, il est souvent bon de pouvoir brancher, le plus vite possible, une certaine fraction de la puissance de l'usine sur le réseau, le reste étant donné plus progressivement quelques instants après. Cette valeur de 0 à $x\%$ n'est pas définie avec autant de précision que la condition d'ouverture de 75 à 100 %, mais il est évident que, toutes choses égales par ailleurs, il y a intérêt à chercher la dissymétrie maxi-

FIG. 4

um, c'est-à-dire, pour une caractéristique donnée de l'étranglement à la fermeture, la dépression maximum à l'ouverture. Le graphique joint, fait à l'aide des abaques CALAME et GADEN, montre, pour Ø 16 m, les possibilités d'ouverture de 0 à $x\%$ en fonction de la valeur de l'étranglement R'_0 à l'ouverture (fig. 4).

2° Calcul à la fermeture complète par le procédé direct et détermination de l'étranglement

Le diamètre du puits étant fixé, nous nous sommes également donné la cote maximum d'eau dans la cheminée d'équilibre, soit 488. Pour un étranglement de valeur R_0 donné, le procédé direct permet de trouver la forme idéale des cham-

bres d'expansion de telle manière qu'au cours d'un déclenchement, à partir du moment où l'eau atteint le radier de la chambre d'expansion la plus basse, la pression sous l'étranglement reste constante et égale à la montée maximum de l'eau dans la cheminée d'équilibre (fig. 5).

Comme nous l'avons expliqué dans l'article du n° 3/1951 de *la Houille Blanche*, une telle cheminée d'équilibre a un volume à peine supé-

FIG. 5

rieur à la cheminée d'équilibre à étranglement optimum (elle pourrait même avoir un volume inférieur avec un diamètre de puits plus petit); mais elle a sur cette dernière le gros avantage d'avoir un étranglement créant une perte de charge moins forte. Or, dans le cas de Randens, la perte de charge maximum étant de 14 m dans la galerie, la montée maximum de l'eau, au-dessus du niveau statique, étant de 17 m, un étranglement optimum aurait créé une perte de charge de $17 + 14 = 31$ m pour $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette surpression, en cas de dé-

FIG. 6

clenchement, aurait été appliquée en quelques secondes sur la galerie (4 s environ). Sans avoir de critère précis indiquant qu'à partir de telle ou telle surpression on risque de détériorer la galerie, il nous a semblé préférable d'adopter un étranglement moins puissant, d'autant plus que le volume de la cheminée d'équilibre était à peine affecté par cette diminution.

Pour fixer notre choix, nous avons fait un certain nombre d'épures par la méthode directe qui nous ont permis de tracer la courbe de la figure 6, qui donne, pour chaque valeur de l'étranglement, le volume de la cheminée d'équilibre correspondante.

On voit qu'à une valeur de R_0 donnée correspond une cheminée d'équilibre de forme bien définie, donc des chambres d'expansion bien définies également. Il nous a semblé qu'un seul étage de chambres d'expansion serait préférable à plusieurs; en effet, l'aération d'une chambre d'expansion en charge est toujours délicate et nécessite des pentes importantes en radier et en calotte, gênantes pour la construction. D'autre part, un étage de chambres d'expansion en charge demande, à son intersection avec le puits, un ferrailage assez important et une forme, donc des coffrages assez compliqués. Compte tenu de la qualité du rocher, nous avons estimé qu'une chambre d'expansion de 8 à 9 m de haut pouvait être creusée sans revêtement; ceci nous conduisait donc à un étranglement R_0 de 15 m et c'est, en définitive, à cette valeur moyenne, qui représente moins de la moitié de l'étranglement optimum, que nous nous som-

mes arrêtés. L'épure permet de construire la courbe des volumes qui n'est évidemment pas une droite (*). Pour nous rapprocher pratiquement de cette courbe, nous y avons inscrit 2 segments de droites qui nous ont donné 2 sections qu'il a été facile de réaliser pratiquement à l'aide de 2 chambres d'expansion de hauteurs différentes. Nous donnons, figure 7, le plan d'ensemble de la cheminée d'équilibre.

Une épure, dans le sens habituel (indirect), faite à partir de la courbe des volumes ainsi définie, nous a montré que la surpression à 20 cm

près était constante et équivalente à un plan de charge à la cote 488, tout au long de la montée de l'eau dans les chambres d'expansion au cours d'un déclenchement à puissance maximum.

Le volume total de cette cheminée est de 12.500 m³; le volume d'une cheminée cylindrique à étranglement optimum est de 12.200 m³, perte 3 %, alors que la valeur de l'étranglement est passée de 31 m à 15 m pour $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$; d'autre part, la forme est plus simple, donc moins onéreuse.

FIG. 7

IV. — COUP DE BÉLIER CRÉÉ PAR L'ÉTRANGLEMENT DE LA GALERIE D'AMENÉE

Ainsi que l'a montré Y. PONSAR dans un article du n° 2/1950 de *la Houille Blanche*, une cheminée d'équilibre à étranglement risque, en cas de déclenchement brutal, lorsque la galerie

d'amenée est de grande longueur, de provoquer une onde de surpression qui remonte en vraie grandeur le long de la galerie jusqu'à une distance $aT/2$ de la prise d'eau :

* Cette épure a été présentée dans le n° 3/1951 de *la Houille Blanche*; nous n'avons pas jugé utile de la reproduire.

a = Vitesse des ondes dans la galerie

T = Temps de fermeture des turbines

c'est le cas de notre installation; les turbines peuvent en cas de déclenchement se fermer à la vitesse maximum des régulateurs, c'est-à-dire en 4 secondes, et la galerie a plus de 16.000 m de longueur. Une onde va donc remonter le long de la galerie jusqu'à une distance d'environ :

$$\frac{a T}{2} = \frac{1.000 \times 4}{2} = 2.000 \text{ m}$$

de la prise d'eau. Ceci est particulièrement grave car les 15 m de surpression se feront sentir jusqu'à la conduite en béton armé qui se trouve avant l'Etrat. Une épure de BERGERON confirma ces prévisions et montra même que la surpression réelle était un peu plus forte que celle prévue, car, à la surpression produite par les 15 m de R_0 , il fallait ajouter la montée de l'eau pendant les quatre premières secondes qui était d'environ 2 m, ce qui portait à 17 m l'onde de surpression qui remontait le long de la galerie.

REMÈDES ENVISAGÉS. — Etant donné l'énorme augmentation du coût de la conduite en béton armé par mètre supplémentaire de pression d'eau à supporter (20 millions/m), il était indispensable de la protéger contre ces surpressions. Une première solution consistait à diminuer la force de l'étranglement. Cette solution a été vite abandonnée parce que :

- En dessous de $R_0 = 10$ m, la forme optimum de la cheminée d'équilibre n'est plus du tout constructive, les chambres d'expansion deviennent trop basses et trop longues;
- Plus R_0 diminue, plus la montée de l'eau durant les quatre premières secondes est grande et il reste, de toute façon, un coup de bélier non négligeable dans la galerie d'amenée;
- Si R_0 est trop faible, les conditions d'ouverture de 0 à x %, comme nous l'avons vu plus haut, deviennent très mauvaises et l'amortissement des oscillations très lent.

Une deuxième solution proposée par Neyrpic consistait à placer, à l'aval de la conduite, des batteries de soupapes antibélier; ces soupapes n'ayant jamais servi à une échelle aussi importante, cette solution n'a pas été retenue.

Enfin, la troisième solution que nous avons retenue — parce qu'elle est la plus simple et la plus sûre — a été de protéger la conduite en béton armé par un puits antibélier. La position et les dimensions de ce puits firent l'objet d'une étude spéciale dont nous allons maintenant retracer les principaux éléments.

V. — ÉTUDE DU Puits ANTI-BÉLIER

L'aération du puits antibélier conduisait à le placer à une profondeur pas trop faible afin de ne pas réaliser une fenêtre d'évacuation d'air trop importante. Cette conclusion était encore renforcée par les conditions d'exécution des travaux qui conduisaient à le placer, de préférence, au voisinage d'une attaque afin de ne pas trop perturber la marche des chantiers. Il était, en effet, possible de l'attaquer au moyen d'une fenêtre indépendante.

Pratiquement, on pouvait envisager trois positions :

— A l'Etrat, à l'origine de l'attaque du tronçon

de tunnel situé dans le lias, donc à l'aval immédiat de la conduite en béton armé;

- Dans le cristallin, au voisinage immédiat de la Léchère, où l'attaque aura une couverture minimum;
- Enfin, à Notre-Dame-de-Briançon, où se trouve une fenêtre d'attaque qui aurait pu être utilisée pour l'aération.

La position du puits antibélier, ses dimensions, sa forme, étaient autant d'inconnues qu'il

nous a fallu lever et qui nous ont conduits à des études assez longues et variées que nous allons exposer succinctement.

Ce puits antibélier participera lui-même à l'oscillation en masse dans le système galerie-cheminée, d'où la nécessité de l'étudier à ce point de vue d'abord. Une fois ses dimensions déterminées, des épures de BERGERON nous permettront d'étudier la marche des ondes de pression.

Le processus d'étude est en somme le même que pour une cheminée d'équilibre, qui sert principalement à diminuer l'intensité des coups de bélier d'onde, mais qui est calculée surtout du point de vue de l'oscillation en masse.

1° Étude théorique en supposant les pertes de charge négligeables (oscillation en masse)

Il est certain que l'hypothèse consistant à négliger les pertes de charge ne peut conduire à des résultats quantitatifs puisqu'elles jouent un rôle considérable dans les phénomènes d'oscillation en masse. Les résultats de cette étude, bien que qualitatifs, nous ont cependant conduits à des conclusions intéressantes, que des études parallèles, mais d'une portée moins générale, faites en tenant compte des pertes de charge, ont d'ailleurs entièrement confirmées.

On sait que l'oscillation dans les cheminées est représentée par les équations suivantes :

$$Z_1 = A \sin \alpha t + B \sin \beta t$$

$$Z_2 = A' \sin \alpha t + B' \sin \beta t$$

Z_1 représente l'ordonnée du niveau dans la cheminée et Z_2 l'ordonnée du niveau dans le puits intermédiaire (en reprenant les notations indiquées par M. ESCANDE dans son ouvrage sur les cheminées d'équilibre).

AA' , BB' , α et β sont calculés à partir de formules relativement simples; l'oscillation est représentée par la superposition des mouvements, l'un de longue période correspondant à la pulsation α , l'autre de courte période correspondant à la pulsation β .

Il n'est, en toute rigueur, pas évident que le niveau maximum atteint lors de l'oscillation en masse soit égal, pour chacun des ouvrages, à la somme des valeurs absolues des amplitudes des deux sinusoides de pulsations α et β , spécialement dans le cas où α et β sont commensurables.

Nous n'avons pas cherché à examiner en détail cette question qui nous faisait entrer dans des considérations dépassant le cadre du calcul des cheminées d'équilibre. Dans le cas qui nous occupe, α et β sont d'un ordre de grandeur tel que (α étant de l'ordre de grandeur de 10 β), les

montées maxima sont pratiquement représentées par $|A| + |B|$ et $|A'| + |B'|$.

a) INFLUENCE DE LA POSITION DU PUIT ANTIBÉLIER. — Nous avons supposé que l'emplacement et les dimensions de la cheminée aval étaient bien déterminés et nous avons examiné quelle était l'influence de la position du puits antibélier prise comme variable. Si le niveau dans le puits antibélier se bornait à suivre la pression dans la galerie, l'ordonnée maximum atteinte, lors de la montée du niveau d'eau dans la cheminée d'équilibre aval, serait égale à KZ , K représentant le rapport de la distance du puits antibélier à la prise d'eau sur la longueur totale de la galerie, Z la montée maximum dans la cheminée.

La différence $(A' + B') - KZ$ représente, dès

FIG. 8

lors, ce que nous avons appelé « l'oscillation parasite » dans le puits antibélier, c'est-à-dire le supplément de montée dû à l'oscillation en masse. Nous avons tracé cette variable dans la courbe représentée sur la figure 8. Cette courbe a une allure pouvant être prévue *a priori*; si le puits antibélier est au voisinage immédiat de la prise d'eau, l'oscillation parasite est nulle puisque, le niveau amont étant supposé fixe, le niveau du puits antibélier ne peut guère osciller, par suite de la rapidité des accélérations dans le tronçon intermédiaire de galerie. Si, au contraire, le puits antibélier est situé près de la cheminée d'équilibre, il se bornera également à en suivre les oscillations pour la même raison.

En définitive, l'oscillation parasite conduirait à des surpressions dans la zone amont sensiblement identiques pour les trois positions.

b) INFLUENCE DE LA SECTION DU PUIT ANTIBÉLIER. — Nous avons étudié, suivant les mêmes bases, quelle était l'influence de la section du puits antibélier sur le mouvement; on aurait pu, en effet, supposer, à première vue, qu'un accroissement de la section pouvait diminuer l'amplitude de la montée dans la cheminée d'équilibre. Nous avons supposé, dans cette étude, pour simplifier, que le puits antibélier était au quart de la distance entre la prise d'eau et la cheminée

d'équilibre. Le calcul nous a conduits aux résultats représentés sur la courbe de la figure 9.

Cette courbe montre immédiatement que l'accroissement de section du puits antibélier ne joue pratiquement pas de rôle sur la montée dans la cheminée, mais que, par contre, la montée dans le puits antibélier est considérablement renforcée.

La demi-oscillation ne part pas de l'origine car, de toutes façons, l'amplitude dans le puits est au moins égale au quart de l'amplitude dans la cheminée d'équilibre, si sa section tend vers 0 (tubes piézométriques). Nous avons effectué les calculs pour un rapport F_1/F_2 supérieur à 1, bien que ce cas ne soit pas intéressant dans la pratique. Si F_2 voit sa section croître indéfiniment, il est certain que l'oscillation tend vers 0, puisque cela revient à déplacer le niveau statique au droit du puits. La courbe passe donc nécessairement par un maximum; il résulte donc de cette étude qu'il faut donner au puits antibélier la section minimum compatible avec le rôle qu'il a à jouer vis-à-vis des coups de bélier. Nous avons admis que sa section devrait être de l'ordre de grandeur de celle de la galerie d'amenée et nous nous sommes arrêtés à un ouvrage circulaire de 6 m de diamètre.

c) ETUDE DU TYPE D'OUVRAGE.

Ouvrage déversant.

Pour que le déversoir soit intéressant, il faut évidemment qu'il soit arasé à une cote notablement inférieure au niveau maximum atteint lors de l'oscillation en masse correspondant au diamètre du puits que nous avons choisi, ce qui

revient pratiquement à l'araser au niveau statique ou très peu au-dessus. Si nous considérons la vitesse de l'eau dans la galerie entre la prise d'eau et le puits déversant, elle sera extrêmement peu freinée par la montée de l'eau dans l'ouvrage. La hauteur accélératrice sera représentée uniquement par la montée du niveau au-dessus du déversoir; elle sera donc très faible. Le débit ne décroîtra donc seulement que dans le tronçon amont de la galerie. Par contre, le freinage dans la portion de la galerie comprise entre le puits antibélier et la cheminée sera accru du fait que la longueur de la galerie sera plus réduite.

Quand le niveau dans la cheminée d'équilibre descendra lors d'une fermeture complète, le débit du déversoir sera égal au débit dirigé dans le sens amont aval du tronçon amont de galerie qui n'aura pas eu le temps d'être freiné, augmenté du débit dans le sens aval amont dans le tronçon aval de galerie. Théoriquement, en supposant le déversoir arasé rigoureusement au niveau statique et le débit du déversoir égal à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une surélévation très faible, on déverserait ainsi $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Dans le cas qui nous intéresse, le débit déversé aurait été un peu plus réduit, mais il atteignait encore une valeur inadmissible qui aurait conduit à prévoir des ouvrages de dérivation très importants, sans compter des pertes d'eau considérables; c'est pourquoi nous avons abandonné cette solution.

Ouvrage à deux sections.

Nous avons vu que si le puits a une grande section sur toute sa hauteur, la montée est aug-

FIG. 9

FIG. 10

mentée. Si, par contre, on lui donne une section agrandie au voisinage immédiat de la montée maximum correspondant au puits de $\varnothing 6$ m, on aura tendance à diminuer la surélévation. Il doit donc exister, pour une section de petit puits donnée et pour une section de chambre d'expansion supérieure donnée, une position optimum telle que la montée résultante se trouve diminuée au maximum. C'est ce que nous avons vérifié quand l'emplacement et le diamètre du puits ont été fixés.

On était donc conduit aux résultats suivants :

1° La protection créée par le puits antibélier sur la zone amont est pratiquement indépendante de sa position le long de la galerie d'amenée.

2° Les ouvrages déversants ou à étranglement ne sont pas intéressants;

3° Il faut donc donner au puits une section minimum compatible avec l'amortissement du coup de bélier;

4° Il est intéressant de réaliser un ouvrage à deux sections en calant le changement de section à une cote optimum à calculer, compte tenu des pertes de charge.

2° Étude d'oscillation en masse en tenant compte des pertes de charge

Ces conclusions découlaient cependant d'une étude faite en négligeant les pertes de charge. Étant donné le rôle fondamental qu'elles jouent dans les phénomènes d'oscillation en masse, il était indispensable de les confirmer au moyen d'épure tenant compte de l'ensemble du phénomène.

Ces épures confirment bien, dans leur ensemble, les conclusions qualitatives que nous avons obtenues précédemment; pratiquement, la surpression dans la canalisation comprise entre la prise d'eau et le puits est sensiblement indépendante de la position de ce dernier. Puisque la section du canal est constante, cette surpression est obtenue simplement en reportant la surpression au puits proportionnellement aux distances puisqu'il n'y a plus, dès lors, de phénomènes de coups de bélier.

Étant donné que la hauteur du puits antibélier croît à mesure qu'on le déplace vers l'aval, puisque l'oscillation est un peu plus grande d'une part, et que, d'autre part, le radier de la galerie s'abaisse, il est intéressant de le mettre

le plus en amont possible; il ne semblait donc pas nécessaire de le placer ailleurs qu'à l'Etrat, ce qui conduisait évidemment au coût minimum, puisque l'ouvrage avait la hauteur minimum du fait de sa proximité de la prise d'eau.

La position et le diamètre du puits antibélier étant fixés, nous avons fait un certain nombre d'épures pour déterminer le calage optimum de la chambre d'expansion. Le résultat de ces épures a été traduit sur les courbes ci-jointes (fig. 10) (*). La forme définitive du puits antibélier est représentée sur la figure 11.

* Cette courbe et les épures correspondantes ont été faites par le bureau Etudes et Entreprises d'Aix-les-Bains.

3° Étude du système par la méthode Bergeron

La raison d'être du puits est l'extinction des coups de bélier en amont, l'oscillation en masse étant parasitaire. Aussi était-il indispensable de l'étudier en détail.

Nous avons donc effectué quelques épures de BERGERON sur le système complet galerie-cheminée d'équilibre-puits intermédiaire, afin de vérifier si le fait de négliger la propagation de la perte de charge de l'étranglement par coups de bélier n'entachait pas d'erreurs systématiques les calculs d'oscillation en masse. L'épure que nous donnons ci-joint montre que l'ordre de grandeur du phénomène est respecté (épure 1).

FIG. 11. Disposition du puits anti-bélier.

Z

----- Epure d'oscillation en masse

VI. — ÉTUDES PARTICULIÈRES

Les dimensions principales de la cheminée d'équilibre et du puits antibélier ainsi définies, nous avons procédé à des vérifications complémentaires destinées à préciser le fonctionnement des ouvrages dans certaines hypothèses de fonctionnement.

Nous exposerons d'abord brièvement les résultats de l'essai sur modèle réduit réalisé à Chatou.

L'objet essentiel de cet essai était de déterminer un étranglement créant 15 m de perte de charge à la montée et la perte de charge maximum à la descente de l'eau; de plus, cet étranglement devait être de forme simple et facile à réaliser pratiquement.

La forme retenue est représentée sur la figure 2. Les performances de ce dispositif, transmises par le Laboratoire, sont indiquées dans le tableau ci-contre :

On remarque que le coefficient de dissymétrie n'est pas tout à fait constant, d'une part lorsque le débit varie, d'autre part suivant le sens de l'écoulement dans la galerie principale. De toute façon, la dissymétrie reste largement supérieure à 2, valeur limite inférieure que nous avons admise *a priori* dans nos calculs. Donc, les possibilités d'ouverture seront d'autant augmentées. Il est à noter qu'il aurait été possible d'obtenir une dissymétrie un peu plus grande en rapprochant la paroi verticale de son orifice, face à l'étranglement, mais on aurait eu alors un « étranglement long » qui aurait prolongé d'autant le cheminement des ondes de coup de bélier.

1° Ouvertures permises par la cheminée d'équilibre et le puits anti-bélier

Ainsi que nous l'avons dit, les conditions d'ouverture sont beaucoup moins définies que les conditions de fermeture et on peut admettre une certaine adaptation de l'exploitation. Nous les avons néanmoins définies dans quelques cas types :

a) OUVERTURE MAXIMUM DE x A 100 % A PARTIR DU NIVEAU STATIQUE MINIMUM 466. — Le calcul par le procédé rétrograde (sans tenir compte du puits antibélier) nous avait donné une ouverture maximum de 67 % à 100 %. Nous avons refait la même épure en tenant compte du puits

Débits en m ³ /s			Résistance de l'ajutage en m
Q ₂	Q ₁	Q ₃	
+ 100	0	— 100	39,7
»	— 20	— 80	39,4
»	— 40	— 60	38,9
»	— 60	— 40	37,2
»	— 80	— 20	36,8
»	— 100	0	36,2
+ 80	+ 20	— 100	26
»	0	— 80	25,2
»	— 20	— 60	25,0
»	— 40	— 40	24,3
»	— 60	— 20	24,1
»	— 80	0	23,4
+ 60	+ 40	— 100	14,6
»	+ 20	— 80	15,5
»	0	— 60	14,4
»	— 20	— 40	14,0
»	— 40	— 20	13,4
»	— 60	0	12,8
+ 40	+ 60	— 100	5,7
»	+ 40	— 80	6,7
»	+ 20	— 60	6,7
»	0	— 40	6,1
»	— 20	— 20	6,4
»	— 40	0	5,7
+ 20	+ 80	— 100	0,6
»	+ 60	— 80	0,9
»	+ 40	— 60	1,0
»	+ 20	— 40	1,8
»	0	— 20	1,6
»	— 20	0	1,5
— 20	+ 100	— 80	0,8
»	+ 80	— 60	0,5
»	+ 60	— 40	0,5
»	+ 40	— 20	0,5
»	+ 20	0	0,6
— 40	+ 100	— 60	3,0
»	+ 80	— 40	2,2
»	+ 60	— 20	2,3
»	+ 40	0	2,5
— 60	+ 100	— 40	5,9
»	+ 80	— 20	5,1
»	+ 60	0	5,3
— 80	+ 100	— 20	10,0
»	+ 80	0	9,5
— 100	+ 100	0	14,3

Le coefficient de dissymétrie pour le débit de 100 m³/s est ainsi :

$$\frac{39,7}{14,3} = 2,77$$

antibélier par la méthode habituelle indirecte (épure n° 2); elle montre que l'influence du puits sur la cheminée d'équilibre est très faible et qu'elle agit dans ce cas particulier dans un sens plutôt favorable. On voit donc que l'ouverture est possible et que les oscillations dans le puits

antibélier restent dans des limites acceptables et, en particulier, ne découvrent pas la calotte de la galerie. Il sera donc toujours possible de mettre en marche, sans précautions spéciales, le dernier groupe (ouverture de 75 à 100 %) quand on est en régime permanent.

EPURE 2. — Ouverture de 67 à 100 %.

b) OUVERTURE DE 0 A 50 % A PARTIR DU NIVEAU STATIQUE MINIMUM 466. — Nous avons vérifié par une épure que la cheminée permettait la prise en charge immédiate de la moitié des groupes en régime stable, la retenue étant au niveau statique minimum 466 et en tenant compte, bien entendu, du puits antibélier. La cote minimum de l'eau, au cours de cette manœuvre, atteint 444,60 m, soit 4,60 m au-dessus du fond; il reste donc une marge de sécurité confortable; cependant, il est à remarquer que

cette marge est bien moins importante dans le puits antibélier puisque, au cours des trois premières oscillations, le niveau dans ce puits descend presque jusqu'à la cote de la calotte de la galerie. Nous ne pensons pas d'ailleurs que cela soit un inconvénient rédhibitoire. L'ouverture maximum possible permise par la cheminée d'équilibre serait de 0 à 68 % (fig. 4).

c) RÉOUVERTURE APRÈS DÉCLENCHEMENT. — Il est souvent intéressant, après un déclenchement

intempestif, de pouvoir recoupler au moins une partie de la puissance le plus tôt possible. Nous avons examiné, à cet égard, quelles étaient les possibilités de l'ouvrage projeté. Le problème peut se résoudre très facilement; traçons, en effet, pour le niveau statique minimum (cas le plus défavorable), l'épure de déclenchement complet et, à partir du niveau minimum dans la cheminée, les épures d'ouverture par le procédé

rétrograde correspondant à différentes ouvertures finales. Une manœuvre donnée pourra être exécutée si l'épure d'ouverture reste à droite de l'épure de fermeture ou si elle lui est tangente; elle ne pourra être exécutée si elles se coupent. L'épure 3 donne le résultat; elle a été faite, pour simplifier, sans tenir compte du puits antibélier, les épures précédentes nous ayant montré, en effet, que celui-ci a très peu d'influence

EPURE 3. — Ouverture après déclenchement.

sur les oscillations dans la cheminée d'équilibre. On voit qu'on peut toujours mettre en charge le premier groupe (ouverture de 0 à 25 m³), mais qu'on ne peut mettre en charge deux groupes immédiatement (ouverture de 0 à 50 m³) qu'à condition de commencer l'opération avant que l'eau ait atteint son niveau maximum (première montée) ou après que l'eau ait atteint son niveau minimum (remontées suivantes); autrement dit, on peut toujours coupler à demi-charge après

un déclenchement quand l'eau remonte dans la cheminée d'équilibre.

d) OUVERTURE TOTALE EN 8 MN. — Ces conditions d'ouverture avaient été admises après enquête auprès de l'exploitation. Nous avons vérifié que la cheminée d'équilibre permettait la manœuvre dans le cas précis suivant : ouvertures successives de chaque groupe en 1 mn avec un intervalle de 1 mn 20 s entre chaque manœuvre. Nous avons donc fait une épure en prenant

le niveau statique de cote minimum 466. Le niveau minimum de l'eau au cours de l'oscillation est atteint 10 mn après l'ouverture du premier groupe et sa cote est 441,60 m, soit encore 1,60 m au-dessus du fond de la cheminée.

On peut imaginer également d'autres manœuvres d'ouverture des quatre groupes en 8 mn, par exemple :

— Ouverture linéaire en 8 mn des quatre groupes; cette manœuvre est trop progressive et utilise très mal l'étranglement; elle est très défavorable. Néanmoins, le niveau minimum atteint (pour le niveau statique 466) est encore 440, soit exactement le fond de la cheminée.

— Ouverture en 1 mn de deux groupes et, en même temps, ouverture linéaire en 8 mn des deux autres groupes. Le minimum est atteint au bout de 4 mn à la cote 442, soit 2 m au-dessus du fond pour une manœuvre effectuée évidemment à partir du niveau statique minimum 466; cette manœuvre est bien plus favorable que la précédente, l'étranglement étant utilisé largement, surtout au début.

On pourrait certainement imaginer d'autres

manœuvres en 8 mn, utilisant encore mieux les possibilités de la cheminée; de toute façon, il résulte de ces études que l'opération est possible, mais qu'il serait bon que l'agent chargé des manœuvres ait devant les yeux un appareil lui permettant de suivre facilement les oscillations du plan d'eau dans la cheminée d'équilibre (et spécialement leur vitesse), et, d'autre part, qu'il sache que la cheminée est mieux utilisée au cours de manœuvres saccadées (toutes proportions gardées, bien entendu) qu'au cours de manœuvres progressives.

e) OUVERTURE POUR $QH = C^{ste}$. — Il est possible que l'usine de Randens soit momentanément appelée à être utilisée en réseau séparé; son régulateur serait alors appelé à régler le débit à puissance constante, si on suppose le rendement constant; cela correspond au débit $QH = C^{ste}$. Nous avons fait une épure relative à une ouverture de 0 à 50 % en faisant $QH = C^{ste}$ par la méthode que nous avons exposée dans le numéro 3/1951 de *la Houille Blanche* (épure 4). Le plan d'eau est abaissé sur la manœuvre classique de 2,80 m.

EPURE 4. — Ouverture de 0 à 50 % avec $QH = C^{ste}$.

f) TEMPS PENDANT LEQUEL LE NIVEAU RESTE EN-DESSOUS DU PIÈGE A BULLES. — Nous avons déterminé, à l'aide du procédé rétrograde, le temps pendant lequel le niveau reste en-dessous du piège à bulles, ce qui nous a servi à dimensionner le réservoir correspondant. L'application du procédé est immédiate et a été également expliquée dans nos études précédentes. Le temps maximum durant lequel le niveau risque de rester en dessous du désaérateur est de 5 mn.

2° Étude des manœuvres de fermeture et des surpressions en galerie

a) ÉPURE DE BERGERON. — Les ondes de surpression provoquées par l'étranglement ne permettaient pas de suivre, dans une épure d'oscillation en masse, la surpression en chacun des points de la galerie. La connaissance de son évolution en chaque point nous paraissait cependant particulièrement intéressante, et, dans ce but, nous avons fait une épure de BERGERON en nous efforçant de nous rapprocher le plus possible des conditions réelles. Cette épure se rapporte à un déclenchement à pleine puissance en 3 s. Nous avons été amenés cependant à modifier un peu la méthode BERGERON classique en utilisant, dans cette épure, la courbe des volumes des épures classiques pour calculer les montées d'eau dans la cheminée d'équilibre et dans le puits antibélier; cette petite modification, qui ne change évidemment rien au principe bien connu de la méthode de BERGERON, est simplement un artifice qui peut être utile dans l'étude des oscillations du plan d'eau dans une cheminée d'équilibre et qui nous a permis de gagner du temps et de la précision dans cette épure. Nous allons exposer succinctement ce procédé.

Considérons (figures 12 et 13) un puits de section F branché sur une galerie d'amenée :

Soit Q_t et Z_t ses caractéristiques débit-niveau à l'instant t , représenté par le point figuratif A_t .

Cherchons le point figuratif $B_{t+\Delta t}$ du puits à l'instant $t + \Delta t$; la méthode de BERGERON

FIG. 12

FIG. 13

nous permet de trouver un premier lieu de $B_{t+\Delta t}$, la droite Δ déduite de considérations sur les ondes, trop connue pour que nous nous y arrêtons. Pour évaluer la montée du niveau pendant cet intervalle, M. BERGERON propose d'utiliser deux droites de pente $\beta = \Delta t / (2F)$, se réfléchissant sur l'axe des Z (figure 12).

L'intersection de la deuxième droite avec Δ donne le point $B_{t+\Delta t}$; en effet, il est facile de calculer que la montée de l'eau dans le puits ainsi défini est $(Q_t + Q_{t+\Delta t}) \Delta t / (2F)$. Théoriquement, donc, la méthode est rigoureuse pour des Δt petits, mais dans le cas des épures que nous avons faites, la pente β était si faible qu'il était très difficile de tracer d'une manière précise ces deux droites, surtout en début d'épure, quand elles traversent presque entièrement le graphique; d'autre part, à chaque changement de section de la cheminée d'équilibre (et il y en a trois dans le cas de RANDENS), il fallait changer de pente β , ce qui était encore une complication. Nous avons donc tout simplement adjoint, à notre épure de BERGERON, la courbe des volumes de la méthode SCHOKLITSCH (fig. 13), ainsi que la droite des $Q_{\Delta t}$. On apprécie à l'avance la position du milieu M du segment AB , qui a pour abscisse $\frac{Q_t + Q_{t+\Delta t}}{2}$. A l'aide de la courbe des volumes, on a la montée d'eau résultante durant cet intervalle $\left(\frac{Q_t + Q_{t+\Delta t}}{2F} \right) \Delta t$. Les deux méthodes aboutissent donc au même résultat. Evidemment, dans la deuxième, il faut apprécier à l'avance le milieu M du segment AB , ce qui n'est pas absolument rigoureux, mais pratiquement, dans nos épures faites avec des intervalles de temps très petits à l'échelle du phénomène ($\Delta t = 6$ s pour une période de 16 mn), cette méthode était nettement plus pré-

cise que la première et surtout les épures étaient beaucoup plus rapides. L'épure n° 1 a été faite suivant ce procédé.

Les hypothèses sont les suivantes :

$$f = 31,1 \quad Q = 100 \quad N. S. = 471$$

$$R_0 = 15 \text{ m} \quad P_0 = 14 \text{ m}$$

$$\text{Temps de fermeture : } 3 \text{ s} = \tau.$$

$$\text{Intervalle de temps : } \Delta t = 6 \text{ s} = 2 \tau.$$

$$\text{Vitesse des ondes dans la galerie} = 900 \text{ m/s.}$$

$$\text{Longueur de la galerie} = 16.200 \text{ m.}$$

$$\text{Distance du puits antibélier à la prise d'eau} = 2.700 \text{ m.}$$

REMARQUE. — Le temps de fermeture et la vitesse des ondes ne sont pas tout à fait conformes à la réalité, mais leurs valeurs ont été choisies pour avoir à modifier le moins possible la longueur de la galerie (16.200 m au lieu de 16.144) et la distance du puits antibélier à la prise d'eau (2.700 m au lieu de 2.680 m), en effet, ces longueurs étant justement des multiples entiers du produit 3×9 . Cet artifice, qui modifie très peu les résultats, tout en gardant leur aspect qualitatif, simplifie énormément l'épure de BERGERON, qui, sans cela, deviendrait tellement compliquée qu'elle serait pratiquement infaisable.

Par mesure de précaution, nous avons super-

posé à cette épure une épure d'oscillation en masse en partant évidemment des mêmes hypothèses. On voit que pour la montée de l'eau dans la cheminée d'équilibre, la superposition est bonne, puisque les cotes sont respectivement 488 m et 488,20 m. Nous rappelons que la cheminée d'équilibre a été calculée pour le niveau maximum théorique de 488; on voit donc que les simplifications dont nous avons parlé plus haut n'ont pratiquement pas modifié le résultat final.

b) SURPRESSION EN GALERIE. — Cette épure nous a permis de faire le graphique des surpressions en différents points de la galerie, en fonction du temps, au cours d'un déclenchement; les résultats sont transcrits sur le graphique de la figure 14. Le point P est situé à 2.700 m à l'amont de la cheminée d'équilibre, H est à 7.100 m et K est à 9.800 m. On suit d'une manière curieuse le passage en chacun de ces points du train d'ondes provoquées par la brusque utilisation de l'étranglement, et on apprécie ainsi combien le phénomène est important. Une remarque s'impose également au sujet de la protection créée par le puits antibélier du côté aval. Théoriquement, en effet, l'onde se fait sentir intégralement jusqu'à une distance égale à $aT/2$ de ce puits, la fermeture des turbines étant supposée linéaire; la surpression sous la cheminée a, en fonction du temps, une allure parabolique jusqu'au maximum atteint une fois

FIG. 14

la fermeture achevée. Elle se propage sous cette forme le long de la galerie; la dépression, renvoyée par la surface libre du reniflard, est représentée par la même parabole de signe opposé. L'allure des surpressions maxima, en un point donné, s'en déduit facilement si l'on remarque que la surpression maximum, en un point, est atteinte quand l'onde directe aboutit à son maximum au point donné. Le calcul est facile et donne, en un point d'abscisse réduite x pour les surpressions :

$$y_m = 4x - 4x^2$$

y représentant la surpression réduite, c'est-à-dire rapportée à la valeur de la perte de charge à travers l'étranglement,

FIG. 15

x l'abscisse réduite, c'est-à-dire rapportée à la distance aT .

Il en résulte que la surpression due aux coups de béliet est tout de suite relativement importante; ainsi, figure 15, à la distance $aT/4$ à l'aval du puits antibéliet, c'est-à-dire à environ 1.000 m dans le cas de Randens, la surpression due aux coups de béliet est encore égale à $3/4$ de y_m , c'est-à-dire à plus de 11 m, et non à $y_m/2$, soit 7,50 m, comme on aurait tendance à le croire à première vue.

Nous aurons donc à tenir compte, en un point de la galerie, de deux surpressions de nature bien différente, bien qu'en définitive toutes deux soient provoquées par des ondes :

— la première, due au coup de béliet de l'étranglement, dont la répartition en fonction de la distance vient d'être étudiée,

— la seconde, due à la montée maximum du niveau dans la cheminée répartie linéairement en fonction de la distance, au moins si la section de la galerie est constante.

Il y a évidemment lieu de comparer ces deux maxima et de les équilibrer par un choix judicieux de la puissance de l'étranglement. Il serait d'ailleurs souhaitable et logique que la surpression du coup de béliet soit inférieure à la surpression d'oscillation en masse, étant donné ses effets dynamiques néfastes. A Randens, cepen-

dant, cette condition n'est pas tout à fait respectée, puisque, dans la partie de galerie située entre Notre-Dame-de-Briançon et l'Etrat, les surpressions dues au coup de béliet sont légèrement supérieures à celles résultant de l'oscillation en masse. Pour satisfaire complètement à cette condition, il aurait fallu placer le reniflard à Notre-Dame-de-Briançon, mais alors ses dimensions auraient été considérablement plus grandes.

c) CONDITION DE FERMETURE LA PLUS DÉFAVORABLE. — Il est bien connu que la fermeture instantanée n'est pas la condition la plus défavorable dans les cheminées à étranglement, l'écart pouvant être d'autant plus grand que l'étranglement est plus efficace.

Nous avons donc appliqué une méthode proposée par les ingénieurs du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, à la suite de notre article du numéro 3/1951 de *la Houille Blanche*, qui permet de trouver directement le cas de fermeture le plus défavorable; cette ouverture n'est d'ailleurs pas, en général, linéaire.

L'écart, avec la fermeture instantanée, est, en réalité, faible, mais ce procédé peut éventuellement présenter un grand intérêt si l'étranglement est plus puissant. Dans le cas de Randens, la fermeture la plus défavorable se fait en 1 mn 10 s; il est à remarquer qu'elle n'est pas linéaire; la surélévation du niveau maximum de l'eau au cours d'un déclenchement est inférieure à 20 cm.

d) DESCENTE CONSÉCUTIVE A LA PREMIÈRE MONTÉE. — VIDANGE DES CHAMBRES D'EXPANSION. — On suppose, tant à la montée qu'à la descente, que le niveau, dans les chambres d'expansion et

FIG. 16

dans le puits, reste horizontal. Cette hypothèse n'est qu'approximative, car il faut évidemment que la hauteur d'eau, à l'entrée de la chambre, soit suffisante pour permettre, au moins en régime dénoyé, d'écouler tout le débit de remplissage de la chambre, soit $S dz/dt$ (fig. 16).

Il est très facile de voir que cette influence est relativement faible dans le cas de cette cheminée, en raison de la section du puits central. Nous l'avons examiné, à la descente, de la façon suivante :

On relève, sur une épure classique, la courbe $Q(t)$ et $h(t)$ pour chacune des chambres d'ex-

pansion et on trace la courbe des hauteurs critiques correspondant aux débits Q (fig. 17).

FIG. 17

Tant que la hauteur dans la chambre est supérieure à la hauteur critique, le débit écoulé correspond sensiblement à ce que donnerait l'hypo-

thèse du niveau constant et horizontal entre puits et chambre.

Au-delà, le débit des chambres est donné par la hauteur à l'aval des chambres d'expansion. Le niveau dans le puits évolue indépendamment du niveau dans les chambres.

Les courbes de la figure 18, tracées en vraie grandeur, confirment que cet effet se produit juste à la fin de la vidange des chambres. Il est d'ailleurs favorable, puisqu'une partie de l'énergie potentielle des chambres est dissipée lors de la chute dans le puits.

Nous verrons, dans un article ultérieur, que ce phénomène peut prendre une importance beaucoup plus grande dans une cheminée à chambre d'expansion et puits de faible diamètre. Nous avons eu l'occasion de le vérifier en faisant fonctionner à pleine charge la cheminée de l'usine de Passy.

FIG. 18

Conclusion

C'est sur ces différentes études que nous avons basé notre projet de cheminée d'équilibre. Etant donné les caractéristiques importantes de l'ouvrage, il a été nécessaire de déborder un peu le cadre des études classiques et d'approfondir no-

tablement certaines questions relatives aux surpressions provoquées par l'étranglement.

Il y a lieu, pensons-nous, de porter une attention spéciale sur ce sujet quand la perte de charge créée par l'étranglement est un peu forte, même si la galerie est assez courte, car on introduit ainsi des phénomènes dynamiques, dont il y a lieu de préciser l'ampleur.