Sur l'évolution du coup de bélier dans une galerie d'amenée à l'amont de la cheminée d'équilibre

On the evolution of water-hammer
in an intake tunnel upstream from a surge tank

PAR

R. JUPILLAT

ET

A. TRIVIDIC

INGÉNIEUR AU LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE

INGÉNIEUR E.I.H.

English synopsis, p. 579.

I. — INTRODUCTION

Certains cas particuliers d'installations hydrauliques avec cheminées d'équilibre, étudiés au Laboratoire National d'Hydraulique, nous ont conduit à suivre de près le phénomène du coup de bélier dû à une fermeture, non seulement dans la conduite forcée, au distributeur et sous la cheminée comme c'est le cas habituellement, mais aussi dans la galerie d'amenée, en amont de la cheminée d'équilibre. Ces cas particuliers se rattachent en fait à celui étudié par M. ESCANDE (*la Houille Blanche*, juillet-août 1949) puisque les cas les plus délicats sont ceux où la cheminée est reliée à la galerie par une conduite de section relativement faible, ou, ce qui revient au même, quand la cheminée se compose d'un puits central avec une chambre d'ex-

pansion située à une cote relativement élevée.

On dit couramment que la surpression engendrée par une fermeture ne se transmet pas dans la galerie d'amenée grâce à la présence de la cheminée. M. ESCANDE a montré que, pour le cas envisagé plus haut, un pourcentage non négligeable de la surpression pouvait être transmis et nous avons voulu étudier quel était le mécanisme de cette transmission. La méthode graphique BERGERON est de beaucoup la plus commode pour cette étude et nous l'avons uniquement employée. Sans donner le détail des différentes épreuves exécutées, nous montrerons simplement la traduction des résultats que nous avons obtenus.

II. — RAPPEL DES NOTIONS DE RÉFLEXION ET DE RÉFRACTION PARTIELLE D'UNE ONDE RENCONTRANT UNE BIFURCATION

Considérons une bifurcation (fig. 1) où une conduite C de section S, et parcourue par une onde de célérité a , se scinde en deux autres conduites C' et C'' de sections S' et S'' et où les célé-

rités des ondes sont a' et a'' . Si on appelle $\alpha = \frac{S}{a}$ l'admittance itérative de chaque conduite, on démontre facilement qu'une onde de surpression

à front vertical F se propageant dans la conduite C donne naissance, à la bifurcation, à une onde réfléchie f se propageant, dans la première

FIG. 1.

conduite en sens inverse de la précédente, et à deux ondes réfractées F' et F'' dans chacune des deux autres conduites et dont les valeurs sont :

$$|f| = F \cdot \frac{\alpha' + \alpha'' - \alpha}{\alpha + \alpha' + \alpha''}$$

$$F' = F'' = F \frac{2\alpha}{\alpha + \alpha' + \alpha''}$$

Si nous supposons que C , C' et C'' sont respectivement la conduite forcée, la cheminée d'équilibre et la galerie d'amenée d'une installation hydro-électrique, on voit que, théoriquement, l'onde réfractée dans la galerie d'amenée ne peut être nulle que si la section de la cheminée est infinie. Si les sections et les célérités de la gale-

rie et de la conduite forcée sont les mêmes, la courbe de variation de la fraction F''/F en fonction de S'/S a la forme indiquée sur la figure 2

FIG. 2.

(hyperbole). On voit que si la cheminée est reliée à la galerie par un puits de section $S' = S = S''$ ou bien est constituée d'un puits central de même section, on aura :

$$F' = F'' = 2/3 \cdot F \quad f = 1/3 \cdot F$$

Donc, dans le cas d'une onde à front raide, et en n'admettant aucune réflexion (cas de conduites infiniment longues), une surpression égale aux deux tiers de la surpression initiale remonte la galerie d'amenée.

Nous allons voir plus loin ce qui se passe lorsque les ondes ne sont plus à front raide, ce qui est le cas en pratique, et comment se fait cette remontée.

III. — ACTION D'UN PUIITS DE RACCORDEMENT ENTRE GALERIE ET CHEMINÉE SUR L'ÉVOLUTION DU COUP DE BÉLIER D'ONDE LE LONG DE LA GALERIE D'AMENÉE

Des conditions particulières de fonctionnement d'une installation hydro-électrique peuvent rendre beaucoup plus économique l'installation d'une cheminée de grande section (chambre circulaire ou galerie d'expansion) reliée à la galerie d'amenée par une conduite ou puits d'un diamètre voisin de celui de la galerie d'amenée ou même plus petit. C'est le cas qui se présente lorsque la retenue peut varier entre deux cotes assez différentes. En général, la cheminée, dimensionnée pour le phénomène des oscillations en masse, est telle que le plan d'eau ne doit jamais se trouver dans le puits. On peut donc dire qu'au point de raccordement puits-cheminée, la pression ne change pas, si on néglige pendant le temps, en général court, de la fermeture, la montée du plan d'eau, et tout se passe comme si, en ce point, il y avait réflexion totale des ondes.

Dans le cas où l'on a une cheminée avec chambre d'expansion supérieure, le niveau du plan d'eau peut descendre dans le puits; seulement, pour simplifier l'exposé, nous admettrons que le déplacement du niveau au-dessous du radier de la chambre d'expansion est faible par rapport à la longueur du puits, de sorte qu'on peut le négliger, et considérer que l'on a toujours le même temps de phase, soit que les ondes se réfléchissent sur le plan d'eau dans le puits, soit à la partie inférieure de la chambre.

Les différents paramètres réagissant sur la transmission de la surpression dans la galerie d'amenée sont la section et la longueur du puits (ou de ce qui en tient lieu) et le temps de fermeture. Nous prendrons à titre d'exemple un cas simplifié d'une installation réelle dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Galerie d'aménée. — Longueur 1.200 m. — Section 11,5 m². — Célérité des ondes 1.200 m/s.
- Conduite forcée. — Longueur 120 m. — Section 8 m². — Célérité des ondes 1.200 m/s.
- Débit maximum 8 m³/s. — Hauteur de chute: 100 m.

Nous ne tiendrons pas compte des pertes de charge dans les différentes conduites et nous admettrons que le passage du débit dans le puits se fait également sans pertes de charge. Cela ne modifie pas la valeur des résultats si on veut bien remarquer que la présence d'une perte de charge au pied d'une cheminée (par le puits ou un ajutage) ne fait qu'augmenter la surpression en chaque point de la galerie d'une valeur égale à la résistance du diaphragme pour le débit le traversant à l'instant considéré. Alors que dans le cas général la surpression due au mouvement des masses d'eau est négligeable pendant le temps de la fermeture qui nous intéresse ici, la présence d'un étranglement crée une surpression dès le début de la fermeture, qui coexiste avec la pression rapidement variable due au coup de bélier. M. PONSAR, dans un article publié dans *la Houille Blanche* de mars-avril 1950, a fait remarquer la gravité de certains cas où l'étranglement crée une perte de charge importante et les moyens d'y remédier.

Les différents phénomènes qui se produisent dans une telle installation sont très différents suivant les temps de fermeture τ des turbines. En effet, si τ est inférieur au temps de phase du puits, la fraction de la surpression qui passe dans la galerie d'aménée atteint son maximum au pied de la cheminée avant que des ondes réfléchies sur le plan d'eau de la cheminée ne puissent venir atténuer cette valeur. Nous étudierons donc successivement les deux cas :

$$\tau < \frac{2l}{a} \quad \text{et} \quad \tau > \frac{2l}{a}.$$

Naturellement, dans la plupart des installations actuelles, les temps de fermeture sont de l'ordre de plusieurs secondes, donc, en général, bien supérieurs au temps de phase possible du puits. Nous envisageons tout de même le premier cas pour montrer les différences dans le mécanisme des phénomènes.

A. — ETUDE DES SURPRESSIONS POUR DES FERMETURES RAPIDES

(Temps de fermeture inférieur au temps de phase du puits.)

Influence de la longueur du puits

Dans ces conditions, la longueur du puits, pour autant qu'elle reste supérieure à $a\tau/2$, n'a d'action que sur la longueur de l'onde de surpression, ou plus exactement sur la longueur de la galerie affectée à chaque instant par la surpression maxima.

Nous avons exécuté deux épreuves dans le cas indiqué plus haut avec un puits de longueur 60 m pour la première et 120 m pour la seconde, et une fermeture en $1/20^{\circ}$ de seconde.

Les surpressions maxima atteintes sont de :

70,7 m pour la première,
et 70,6 m pour la seconde.

FIG. 3.

FIG. 4.

Par contre, la longueur de galerie affectée par la surpression maxima est de 60 m pour le premier cas et de 180 m pour le deuxième (fig. 3 et 4). Quand la longueur du puits devient inférieure à $a\tau/2$, on se trouve dans le cas d'une fermeture lente relativement au puits et c'est le cas traité plus loin.

Influence de la section du puits

Puisque les réflexions sur le plan d'eau n'ont pas le temps d'intervenir, on conçoit que, dans ce cas, la théorie exposée dans le premier paragraphe s'applique convenablement, et que les fractions de surpressions transmises dans la galerie soient conformes à la courbe tracée figure 2.

En effet, les épures le montrent bien, et reprenant les résultats de celles réalisées pour des sections de puits de 8 et 16 m², on vérifie que les surpressions atteintes sont au maximum : 70,7 m et 55 m respectivement, soit dans le rapport 0,78, alors que la courbe théorique donne 0,75 (fig. 5).

FIG. 5.

B. — ETUDE DES SURPRESSIONS POUR DES FERMETURES LENTES

Une fermeture sera lente, dans le cas qui nous intéresse, si elle se fait en un temps supérieur

FIG. 6.

au temps de phase du puits de liaison. Dans ces conditions, les premières ondes de surpression qui atteignent le pied de la cheminée, peuvent subir une réflexion sur le plan d'eau et revenir avant la fin de la fermeture, de sorte que la valeur maxima de la surpression peut être, dans certains cas, réduite.

Influence de la longueur du puits

Si l'on traite le même cas que précédemment, mais avec un puits de longueur variable, comprise entre 0 et $a\pi/2$, on constate que le maximum de la surpression pénétrant dans la galerie d'amenée, et corrélativement la surpression maxima au distributeur augmentent dans de grandes proportions.

Les courbes de la figure 6 montrent les valeurs de la surpression atteinte au pied de la cheminée et au distributeur pour des longueurs de puits variant de zéro à une fois la longueur de la conduite forcée, les caractéristiques de l'installation étant :

- Longueur galerie d'amenée : 240 m.
- Longueur conduite forcée : 120 m.
- Longueur puits de raccordement : 0 à 120 m.
- Débit : 5 m³/s.
- Temps de fermeture : 2 secondes.
- Pertes de charge négligées.

Les valeurs atteintes par le maximum de la surpression sont :

- 0 pour un puits inexistant (cheminée infiniment grande).
- 1,20 m pour une longueur de 1/4 celle de la conduite forcée,
- 2,10 m pour une longueur de 1/2 celle de la conduite forcée,
- 3,50 m pour une longueur de 1 celle de la conduite forcée,

tandis qu'au distributeur les maxima sont :

5,40 — 6,20 — 6,40 — 7,80 m

On remarque que, dans ce cas, les oscillations de la surpression sont assez importantes, c'est que la galerie d'amenée a une longueur relativement faible.

La comparaison des résultats qui nous sont donnés par les épures nous montrent l'influence du temps de fermeture sur la valeur de la surpression et sur la forme de l'onde.

Les figures 3, 7, 8, 9 en sont la traduction graphique :

Figure 3 :

Puits 60 m. $\tau = \frac{1}{20}$ sec. $H_{\max} = 70,7$ m.

FIG. 7.

FIG. 8.

FIG. 9.

Figure 7 :

Puits 60 m. $\tau = 2$ sec. $H_{\max} = 3,4$ m

Figure 8 :

Puits 120 m. $\tau = 2$ sec. $H_{\max} = 6,6$ m.

Figure 9 :

Puits 30 m. $\tau = 2$ sec. $H_{\max} = 1,8$ m.

Influence de la section du puits

Il est logique de penser qu'une augmentation de la section du puits aura une influence favorable sur la valeur absolue de la surpression maxima. En fait, les épures exécutées pour des sections de puits de 8 m^2 (fig. 7) et de 16 m^2 (fig. 10) montrent que les surpressions maxima sont diminuées dans des proportions plus importantes que ne l'indique la théorie :

3,40 m pour 8 m^2 ($l = 60$ m)

2,10 m pour 16 m^2 ($l = 60$ m)

pour une fermeture en 2 secondes. Cela s'explique par les réflexions complémentaires sur le plan d'eau de la cheminée.

FIG. 10.

Cas du diaphragme

Le cas de la fermeture en un temps supérieur à $2l/a$, l étant la longueur du puits, est pratiquement le cas des diaphragmes ou ajutages au pied d'une cheminée. Laissant de côté la surpression introduite par ces organes du fait de la perte de charge au passage d'un débit déterminé, on peut les assimiler, du point de vue transmission des ondes de surpression, à un puits très court, et les courbes de la figure précédente montrent bien que, dans le cas où le puits a une longueur faible vis-à-vis de la conduite forcée, il ne crée qu'une surpression complémentaire négligeable. C'était d'ailleurs la conclusion de M. ESCANDE disant que les craintes inspirées par les diaphragmes étaient injustifiées. Il suffit simplement, dans un projet comprenant un ajutage, de tenir compte de la surpression de masse introduite, surpression dont il aurait bien fallu tenir compte même si l'on n'avait pas employé de diaphragme, car à ce moment, la montée du plan d'eau, à section de cheminée égale, aurait été plus importante. La

seule différence est que la surpression due à la perte de charge du diaphragme intervient dans l'intervalle de temps de fermeture et se super-

pose au coup de bélier tandis que la montée seule du plan d'eau a une durée beaucoup plus longue.

IV. — PROTECTION CONTRE LES SURPRESSIONS IMPORTANTES DANS LA GALERIE D'AMENÉE

Dans certains cas, nous avons vu qu'un puits de cheminée d'équilibre peut créer des surpressions gênantes, mais, par ailleurs, un tel puits peut jouer un rôle favorable dans des conditions légèrement différentes.

Supposons qu'une galerie d'amenée très longue puisse être soumise sur toute sa longueur à une surpression importante (produite par un diaphragme ou toute autre cause) et que l'on veuille en protéger une certaine longueur à la partie amont. Un puits secondaire, branché sur la galerie immédiatement en aval de la zone à protéger, remplira parfaitement ce rôle. Même si l'on se place dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire celui où l'onde incidente, compte tenu des dimensions du puits, se comporte comme une onde à front raide, un puits de section égale à celle de la galerie abaisse de 33 % la valeur de

la surpression. On conçoit que, dans bien des cas, cette diminution soit suffisante, et qu'elle peut même être beaucoup plus importante avec une section plus grande ou des ondes à front plus incliné. C'est ce que montre l'épure reproduite figure 12, dans les conditions indiquées figure 11, la réduction de surpression est de l'ordre de 75 %.

FIG. 11. — CHUTE 100 m.
Débit initial 8 m³/s. — Temps de fermeture : 20 τ = 1 s.

En réalité, le puits secondaire ainsi installé ne joue qu'un rôle anti-bélier, c'est-à-dire qu'il ne modifie pratiquement pas le volume nécessaire de la cheminée principale, mais son coût peut être inférieur à celui des renforcements d'une galerie sur une grande longueur.

FIG. 12.

CONCLUSIONS

En résumé, un puits de raccordement entre galerie d'amenée et cheminée d'équilibre ne peut provoquer des surpressions importantes dans toute la galerie d'amenée que pour des fermetures très rapides qui ne se rencontrent pratiquement jamais dans les installations réelles. Par conséquent, si l'intérêt économique est de réaliser une telle installation, il n'y a pas lieu de craindre, dans la plupart des cas, des surpressions graves dues à la longueur de ce puits. Naturellement, il convient de toujours tenir compte, et surtout dans le cas du diaphragme, de la surpression engendrée par la perte de charge de l'écoulement à travers cet ouvrage. Dans le cas où cette dernière surpression serait trop importante pour une partie de la galerie, un puits installé en aval de la zone à protéger, peut, même avec de faibles dimensions, la réduire suffisamment.

DISCUSSION

M. le Président souligne l'intérêt de la communication de M. JUPILLAT.

Sur sa demande M. JUPILLAT indique que le problème qui fait l'objet de sa communication a été étudiée à l'occasion de la mise au point au Laboratoire National d'Hydraulique, des projets de quelques cheminées d'équilibre actuellement en construction en France et dans l'Union Française.

Pour une grande usine des Alpes comportant une galerie d'amenée en charge de 16 km et une cheminée à étranglement, l'étude a montré que la surpression due à la perte de charge à travers le dit étranglement au moment d'un « déclenchement » de l'usine se transmettait quasi intégralement le long de la galerie d'amenée. La partie amont de celle-ci étant constituée sur une longueur d'environ 4 km par une conduite en béton armé à ciel ouvert, ce phénomène conduisait à renforcer cette partie de l'ouvrage pour lui permettre de résister à la dite surpression. Il a été trouvé plus économique de supprimer ce renforcement en établissant, suivant la suggestion de M. RÉMÉNIÉRAS, à la jonction de la conduite en béton armé et du canal souterrain, une cheminée d'équilibre secondaire qui interdit pratiquement la transmission de la surpression vers l'amont.

M. RÉMÉNIÉRAS précise quelques points relatifs à l'aménagement ci-dessus et souligne le fait que dans la communication de M. JUPILLAT on a choisi à dessein des temps de fermeture des distributeurs de turbine et des dimensions d'ouvrages très différents de ceux adoptés généralement en pratique, afin de mieux faire ressortir le mécanisme des phénomènes étudiés. Il n'en reste pas moins vrai qu'il est prudent de vérifier dans chaque cas particulier que leur importance ne met pas en danger la sûreté des ouvrages.

M. le Président remercie M. RÉMÉNIÉRAS de ses explications complémentaires.

D'autre part, M. le Président fait allusion à la nécessité du revêtement des galeries pour parer aux surpressions et même aux pressions dans les terrains médiocres, comme certains calcaires de l'Afrique du Nord, et demande si des mesures expérimentales de ces surpressions ont déjà été entreprises.

M. RÉMÉNIÉRAS répond que ces mesures sont toujours envisagées mais non encore réalisées systématiquement par le Service des Etudes et Recherches Hydrauliques d'E.D.F. Les mesures de surpression faites à l'occasion d'essais de réception de turbine semblent montrer, en général, un amortissement beaucoup plus rapide que

celui que donnerait l'épure de M. BERGERON sous la seule action des pertes de charge.

M. le Président demande si l'amortissement n'est pas plus rapide dans les galeries non revêtues.

M. RÉMÉNIÉRAS répond qu'il en est probablement ainsi, la perte de charge plus importante que dans les galeries lisses réduisant les surpressions; de plus la compression et la dilatation des poches d'air constatées au ciel des galeries par M. RÉMÉNIÉRAS et M. BOURGUIGNON au cours de leurs expériences sur la galerie du Vénéon pour la détermination des pertes de charge dans les galeries par circulation d'air peuvent avoir une influence sur l'allongement des ondes de surpression, par diminution de leur célérité.

M. BERGERON ne croit pas que l'air emprisonné dans les conduites ou galeries puisse être la cause d'un amortissement important. S'il diminue la célérité des ondes, par contre il ne peut provoquer l'amortissement que par l'énergie dissipée dans la compression et la décompression du gaz, généralement faible par rapport à l'énergie totale mise en jeu. Il y a lieu toutefois de noter qu'une des causes d'amortissement rapide est la non-étanchéité des conduites ou galeries.

M. RÉMÉNIÉRAS pense qu'un débit de fuite, même faible, accroît sensiblement l'amortissement des coups de bélier. Cependant l'influence de l'air est très sensible sur les coups de bélier de « fermeture rapide » dans les conduites métalliques; en raison de la grande rigidité de l'acier, il suffit de très peu d'air en émulsion dans l'eau pour changer la célérité des ondes élastiques dans la conduite.

M. DE SAINT-VAULRY a constaté dans les coups de bélier qui se produisent dans les installations de pompes avec réservoirs d'air, qu'il n'y avait pas réversibilité entre la loi de détente et celle de compression. La dépression d'air crée un froid intense qui est partiellement compensé par des apports de chaleur extérieurs et inversement pour la compression. Ces fuites irréversibles de chaleur influencent certainement l'amortissement.

M. DURANTON signale que la cheminée à étranglement dissymétrique décrite par MM. RÉMÉNIÉRAS et JUPILLAT a fait l'objet d'une étude comparée avec une cheminée déversante, arasée au niveau statique, dépourvue d'étranglement et munie d'un ouvrage de décharge restituant les déversements au canal de fuite de l'usine.

Cette comparaison a été motivée par le volume considérable de la cheminée non déversante et le développement réduit de l'ouvrage de décharge qui peut être cons-

titué par une conduite posée sur le terrain ou par un puits vertical parallèle aux puits blindés qui alimentent la centrale souterraine (hauteur de chute 150 m). Les devis estimatifs des deux cheminées ont fait ressortir des coûts équivalents à 10 % près. Mais en supprimant pratiquement toute surpression dans la galerie d'amenée, la solution déversante permet sans doute de réaliser sur les revêtements et injections des économies particulièrement sensibles du fait de l'importance de la galerie (longueur 16 km — section nette 32 m² — débit équipé 100 m³/s). D'autre part, et plus généralement, il est à noter que les déversements engendrent un amortissement des oscillations comparables à celui créé par un étranglement, à condition que le marnage de la retenue soit faible (quelques mètres).

Par contre, M. Duranton a également étudié dans un cas de marnage important (plusieurs dizaines de mètres) une cheminée non déversante, sans étranglement, qui

pouvait très bien se satisfaire d'une section faible à la partie inférieure pourvu que le temps d'ouverture soit long. Mais, lors d'une fermeture à niveau bas, l'eau monte d'abord jusqu'en haut de la cheminée d'équilibre et redescend en découvrant l'orifice de la galerie. En l'absence d'un amortissement suffisant des oscillations en masse, il s'ensuit donc une entrée d'air dans la galerie. Le débit étant coupé, cet air n'est pas instantanément entraîné, mais il peut rester emprisonné dans la galerie et donner lieu à des incidents lors des démarrages suivants. (MM. RÉMÉNIÉRAS et BERGERON estiment qu'il est prudent d'éviter cet inconvénient.) Un étranglement est souvent la bonne solution pour créer cet amortissement indispensable.

M. le Président conclut que la discussion a élargi le sujet et que les essais qui pourront être faits sur les indications existantes seront à suivre.

ERRATUM

Nous avons reçu, de M. LACOMBE, la lettre ci-après :

DIFFRACTION DE LA HOULE EN INCIDENCE OBLIQUE

RÉFÉRENCE :

- a) *Mémoires et Travaux de la S.H.F.*, vol. I, 1951.
- b) *La Houille Blanche*, n° spécial A, 1951.

Monsieur le Président,

A la suite de vérifications effectuées à propos de l'établissement d'un texte plus détaillé de la communication figurant dans les publications citées en référence a) et b), des inexactitudes me sont apparues et j'ai l'honneur de vous proposer de les corriger par *erratum* dans un prochain numéro des *Mémoires et Travaux*.

1° Page 25 de la référence a) et page 235 de la référence b), colonne de droite, 6^e formule à partir du haut :

$$\frac{dr}{\pm \sqrt{r^2 - Y^2}} = \frac{d_2}{\pm 2 \sin \alpha \sqrt{\frac{\varphi^2}{16} + \frac{Y}{2} \cos \alpha}}$$

le facteur $\sin \alpha$ ne doit pas figurer; et il y a donc lieu de lire :

$$\frac{dr}{\pm \sqrt{r^2 - Y^2}} = \frac{d_2}{\pm 2 \sqrt{\frac{\varphi^2}{16} + \frac{Y}{2} \cos \alpha}}$$

2° La figure 7 page 27 (a) et 237 (b) présente une inexactitude : il y a une légère dissymétrie de la

« feuille » centrale par rapport à la direction de propagation. Le calque joint donne la figure exacte.

3° A la page 27 (a) et 237 (b), colonne de droite, le texte des lignes 5 à 11 depuis « l'amplitude maximum