Sur les surpressions qui peuvent résulter du remplissage d'une bêche de turbine par ouverture de sa vanne de garde

On possible pressure surges resulting from the opening of the head gate prior to filling the turbine casing

PAR M. BONNET

INGÉNIEUR AU SERVICE DES ETUDES ET RECHERCHES HYDRAULIQUES
D'ELECTRICITÉ DE FRANCE

English synopsis, p. 580.

Au cours d'essais de réception effectués par ses soins, sur les groupes turbine-alternateur de nombreuses usines hydroélectriques, la Division « Essais Extérieurs » du Service des Etudes et Recherches Hydrauliques d'Electricité de France a eu quelques rares occasions d'observer que des surpressions notables peuvent résulter du remplissage d'une bêche de turbine par ouver-

ture de sa vanne de garde. Dans un cas où ce phénomène était particulièrement remarquable, puisque la pression maximum observée dépassait sensiblement celle résultant de la disjonction d'un groupe, il nous a paru intéressant d'analyser le phénomène; la présente note résume les résultats obtenus.

I. — DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'INSTALLATION

L'usine utilise l'eau sous une hauteur de chute brute voisine de 110 m. Ses trois groupes sont à

axe horizontal et munis d'orifices compensateurs; les groupes n^{os} 2 et 3 absorbent un débit

FIG 1. — Profil en long de la conduite.

FIG. 2. — Schéma de l'installation

voisin de $3 \text{ m}^3/\text{s}$ et le groupe n° 1 un débit de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ environ; ils sont alimentés à partir d'un canal à écoulement libre, par une conduite forcée de 800 m de longueur, dont le diamètre varie entre 1,80 m et 1,50 m.

Les vannes papillon constituant les organes

de garde des turbines ne comportent pas de by-pass.

La figure n° 1 donne le profil en long de la conduite forcée; la figure n° 2 montre le raccordement des groupes au collecteur.

II. — RÉALISATION DES ESSAIS. — RÉSULTATS OBTENUS

Tous les essais, sauf un, ont été réalisés dans les mêmes conditions : la vanne de garde a été ouverte après un certain temps d'arrêt du groupe pendant lequel le distributeur était resté fermé; préalablement au premier essai effectué sur le groupe n° 2, la bêche avait été partiellement vidangée par ouverture momentanée du distributeur.

Les variations de pression étaient mesurées à 0,50 m à l'amont de la vanne de garde.

Nous reproduisons dans la figure n° 3 les enregistrements obtenus. Les courbes relevées ont toutes la même allure. Après une légère

dépression, on observe une surpression de valeur élevée. Par suite des réflexions successives à la chambre d'eau, cette perturbation donne naissance à des oscillations périodiques.

La valeur de la surpression maximum observée à la base de la conduite est très importante : 27 m pour l'un des essais, à peine inférieure à la valeur garantie en cas de fermeture totale ou partielle (27,25 m); elle dépasse de beaucoup la valeur de la surpression maximum consécutive à la décharge du groupe (18 m).

Le tableau n° 1 ci-contre rassemble les résultats relatifs aux divers essais.

III. — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS D'ESSAI

L'ouverture de la vanne de garde engendre successivement à la base de la conduite une dépression, due au débit de remplissage de la bêche, et une surpression, provoquée par l'arrêt de ce débit, lorsque la pression de l'air emprisonné dans la bêche atteint la valeur correspondant à la pression statique de la conduite.

Les oscillations de pression qui succèdent à la perturbation initiale sont très peu amorties, par suite vraisemblablement de la faible valeur du débit de fuite du distributeur.

Pour suivre l'évolution du phénomène et déterminer la répartition des surpressions le long de la conduite forcée, nous avons utilisé la méthode graphique de BERGERON.

A. — ETUDE DU PHÉNOMÈNE PAR LA MÉTHODE BERGERON (1).

Les données de construction de l'épure sont,

(1) Nous n'avons pas jugé utile de reproduire ici les diverses épures Bergeron mentionnées à ce paragraphe.

FIG. 3. — Relevés des surpressions à l'amont de la vanne de garde

TABLEAU N° 1
RÉSULTATS D'ESSAI

N° DE L'ESSAI	GROUPE 1 A1	GROUPE 2			GROUPE 3 C1
		B1	B2	B3	
Temps d'ouverture de la vanne s	7,5	37,5	37,5	37,5	38,5
Surpression maximum au-dessus de la pression statique m	19,2	27	26,5	25,5	23,7

pour la durée correspondant au temps de remplissage de la bêche, la variation de pression

FIG. 4. — Variations du débit à la vanne de garde.

relevée à l'amont de la vanne de garde au cours de l'essai n° 1 du groupe n° 2 et la célérité des ondes.

La loi de variation du débit pendant cette période, telle qu'elle résulte de l'épure, a été représentée sur la figure n° 4, où a été tracée également la courbe déduite du calcul direct effectué d'après la loi d'ouverture de la vanne et les caractéristiques géométriques de la bêche de la turbine.

Ce calcul a été mené en admettant que le débit traversant la conduite est à chaque instant proportionnel à la section S laissée libre par la vanne, corrigée d'un coefficient de contraction pris égal à 0,8 et à la racine carrée de la différence des pressions Δh existant entre l'amont et l'aval de cette vanne :

$$Q = S \times 0,8 \times \sqrt{2g\Delta h}$$

Au début de la manœuvre d'ouverture, la

contre-pression au distributeur est très voisine de la pression atmosphérique, jusqu'à ce que le plan d'eau s'établisse au niveau du point le plus haut du distributeur. Ensuite, l'air emprisonné sous la culotte supérieure de la bêche crée une contre-pression calculée d'après la loi de MARIOTTE.

On peut constater que la courbe obtenue en admettant que l'ouverture de la vanne s'effectue à vitesse angulaire constante pendant les premiers instants de son mouvement, est très voisine de celle résultant de l'épure BERGERON (1). Celle-ci doit donc représenter assez fidèlement les phénomènes réels pendant la durée de remplissage de la bêche.

Pour la période postérieure, nous avons tracé une épure utilisant encore comme donnée la variation de pression observée.

Elle conduit, par suite des irrégularités de l'enregistrement des pressions, à une loi de débit à la vanne de garde qui semble assez arbitraire, et que nous avons représentée sur la figure n° 4.

(1) Ajoutons que le volume de la bêche, calculé d'après la loi de variation de débit déduite de l'épure, est de 1,3 m³, valeur pratiquement égale au volume effectif.

Par suite, il nous a paru prudent d'évaluer l'influence d'une modification de la loi de débit à la vanne de garde sur la loi de répartition des surpressions le long de la conduite.

Nous avons établi dans ce but deux épures :

- Dans l'une, le débit est supposé constamment nul à la vanne de garde,
- Dans l'autre, nous avons admis une compression isotherme de l'air emprisonné à la partie supérieure de la bêche.

La courbe de variation de débit à la vanne de garde qui s'en déduit est représentée sur la figure n° 4 précitée.

La figure n° 5 reproduit, outre l'enregistrement relevé, les variations de pression à la vanne de garde d'après ces deux épures. Elle met en évidence l'influence de la poche d'air, qui tend à accroître l'amplitude des surpressions et des dépressions.

La courbe relevée se place entre celles qui correspondent respectivement à l'absence de poche d'air, et à une variation de pression isotherme de l'air comprimé dans la bêche.

La comparaison des résultats des trois épures montre que la répartition des surpressions le

long de la conduite est toujours approximativement la même, ainsi qu'en témoigne le tableau ci-après :

TABLEAU N° 2

RÉPARTITION DES SURPRESSIONS LE LONG DE LA CONDUITE POUR DIFFÉRENTES CONDITIONS AUX LIMITES AVAL.

CONDITIONS AUX LIMITES AVAL DE L'ÉPURE	SURPRESSIONS MAXIMA AU-DESSUS DE LA PRESSION STATIQUE			
	à l'usine m	à 200 m de l'usine m	à 400 m de l'usine m	à 600 m de l'usine m
Surpression relevée	27	23,5	17,5	11
Débit nul.....	23,5	22	17	13
Compression isotherme de l'air dans la bêche..	30	26,5	21	16,5

B. — RÉPARTITION DES SURPRESSIONS LE LONG DE LA CONDUITE

Nous avons représenté, à titre d'exemple, sur la figure n° 6, les surpressions en quatre points distants de 200 m, en admettant une compression isotherme de la poche d'air.

La figure n° 7 reproduit la courbe enveloppe des pressions maxima le long de la conduite (1). On peut constater que la valeur de la surpression diminue relativement peu quand on s'éloigne vers l'amont.

La coupure du débit maximum de remplissage de la bêche intervenant à partir d'un régime permanent, et suivant la loi de décroissance déduite de l'épure, engendrerait un coup de bélier dont la valeur maximum serait voisine de 21 m et dont la répartition le long de la con-

(1) La répartition des surpressions représentée est la plus défavorable de celles qui résultent des tracés des trois épures.

FIG. 7. — Répartition des pressions le long de la conduite.

duite s'écarterait moins de la répartition linéaire que la surpression obtenue (2).

L'excédent de pression observé dans le cas actuel sur la majeure partie de la conduite est dû à l'augmentation du débit précédant l'arrêt; en effet, les ondes de dépression dues à cette variation de débit se réfléchissent avec changement de signe à la chambre d'eau, et interfèrent avec les ondes de surpression créées par la décroissance du débit.

(2) Il est à remarquer que le débit s'annule en 1,6 s environ, durée qui caractérise la limite entre les fermetures lentes et rapides.

La superposition de ces deux ondes positives peut amplifier, en certains points, la valeur de la pression.

Il est donc raisonnable d'admettre que, dans une grande partie de la conduite, la valeur absolue maximum de la surpression peut être sensiblement la même qu'au distributeur. En admettant que les conditions réalisées au cours de l'essai n° 1 du groupe n° 2 soient les plus défavorables, sa valeur peut dépasser, dans la partie amont de la conduite, 50 % de la pression statique, ainsi que le montre le tableau ci-dessous.

TABLEAU N° 3

RÉPARTITION DES SURPRESSIONS
LE LONG DE LA CONDUITE

DISTANCE DU POINT CONSIDÉRÉ A L'USINE	m	0	100	200	300	400	500	600	650	700	800
Surpression absolue.....	m	27	27	26	23	20	19	16	14	13	0
Pression statique.....	m	109	86	81	76	62	49	39	30	23	0
Surpression relative rapportée à la pression statique.....	%	24	32	32	30	32	39	41	48	57	0

CONCLUSION

Cet exemple montre que le remplissage de la bêche d'une turbine (dont le distributeur est fermé et relativement étanche) par ouverture de sa vanne de garde peut, dans certains cas particuliers, produire une surpression excédant celle correspondant à la décharge brusque du groupe; le danger de cette surpression est accru par le fait que sa répartition le long de la conduite n'est pas linéaire mais peut se rapprocher de la répartition dite « intégrale » produite par un coup de béliet de « fermeture rapide ». Ce phénomène est à craindre notamment dans le cas d'une conduite d'assez grande longueur et d'une vanne de garde ne comportant pas de by-pass.

Les calculs précédents montrent qu'il est possible d'évaluer dans chaque cas la valeur des

surpressions à craindre en tous points de la conduite.

Il semble d'ailleurs facile de réduire l'importance de ces surpressions : il suffit d'assurer le remplissage de la bêche au moyen d'un débit suffisamment faible pour que les dépressions initiales et les surpressions qui leur succèdent aient une valeur très réduite; en l'absence d'un by-pass, cela peut être obtenu en effectuant le mouvement d'ouverture en deux étapes, la première étant constituée par un simple décollement de la vanne, suivi d'un temps d'arrêt dont la durée serait déterminée expérimentalement, mais qui, dans le cas analysé ici, n'excéderait vraisemblablement pas une vingtaine de secondes.

DISCUSSION

M. le Président remercie M. BONNET et demande si, dans le cas où l'air est emprisonné sous la calotte supérieure de la bêche l'écart entre la courbe réelle et la courbe déduite de l'application de la loi de MARIOTTE ne viendrait pas de ce qu'on serait plus près d'une compression adiabatique que d'une compression isotherme.

M. BONNET estime que cette explication est plausible, mais n'a pas essayé de la vérifier. Il signale une autre raison possible de la discordance de ces deux courbes : c'est le fait que la vitesse angulaire d'ouverture de la vanne n'est peut-être pas linéaire pendant le premier instant de fonctionnement, ainsi que cela a été supposé, car le couple à fournir diminue au fur et à mesure que la contre-pression s'accroît.

M. GADEN compare les expériences de M. BONNET où le distributeur était bien fermé et l'amortissement de la surpression très lent, avec les essais pratiques de réception de turbine de MM. RÉMÉNIÉRAS et BOURGUIGNON, mentionnés à propos de la communication précédente, dans lesquels, la turbine restant en ouverture de marche à vide, c'est-à-dire incomplètement fermée, la moindre ouverture pouvait être une cause des amortissements rapides des coups de béliet constatés.

M. RÉMÉNIÉRAS est bien d'accord sur l'importance des fuites sur l'amortissement des coups de béliet. Il précise que, dans l'expérience relatée par M. BONNET, la bêche de la turbine est déjà remplie d'eau plus qu'à moitié; donc le volume à remplir sous le débit de la vanne est relativement faible, ce qui explique la rapidité de la coupure de ce débit.

Au nom de M. ESCANDE, empêché d'assister à la séance, M. RÉMÉNIÉRAS résume une observation faite par ce dernier dans une usine des Pyrénées. Celle-ci comportait

une galerie d'aménée en charge, une chambre d'équilibre à étranglement et une conduite forcée alimentant sous une chute de 800 mètres des turbines Pelton. Au moment où les essais de réception allaient être effectués une manœuvre intempestive de la vanne de garde de la turbine, à l'arrêt, a provoqué un violent coup de béliet à front raide et engendré quelques fissures dans le canal d'aménée, au voisinage de la chambre d'équilibre. Le phénomène est tout à fait analogue à ceux dont M. BONNET a parlé dans sa communication. Si l'on ferme d'abord la vanne de garde et ensuite l'injecteur d'une turbine Pelton en service, l'intervalle entre ces deux organes se trouve rempli d'air; si à ce moment on ouvre la vanne de garde, ce volume d'air, très faible, se comprime rapidement à la pression correspondant à la chute statique de 800 m et le débit de la vanne de garde se trouve coupé en un temps très court. M. ESCANDE a mesuré dans ces conditions, une surpression de 232 m immédiatement à l'amont de la vanne de garde. La transmission de cette surpression, le long de la conduite étant ici encore « quasi intégrale » il en résulte des surpressions au voisinage de la cheminée d'équilibre qui expliquent fort bien les fissures constatées dans cette région.

M. GADEN dit que ce phénomène, dangereux surtout dans les turbines Pelton, est bien connu des turbiniers qui y parent sans peine en prévoyant des by-pass sur les vannes de garde et en manœuvrant ces by-pass suivant une consigne convenable comme le proposent MM. RÉMÉNIÉRAS et BONNET.

M. RÉMÉNIÉRAS ajoute que certaines observations faites au cours d'essais de réception montrent que les cas cités respectivement par M. BONNET et par M. ESCANDE ne sont certainement pas isolés.