Utilisation des galeries souterraines en réservoirs d'éclusées

Use of subterranean tunnels as compensating reservoirs

PAR G. LABAYE ET R. DURANTON,

INGÉNIEURS A LA DIRECTION DE L'ÉQUIPEMENT D'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

Pendant les périodes d'étiage les galeries souterraines peuvent être exploitées en réservoir d'éclusée. Quel est le volume pratiquement utilisable? Lors d'une éclusée, le débit turbiné est très supérieur au débit d'apport et la galerie, par vidange, se met progressivement à écouler libre. Il arrive un moment où le régime critique est atteint dans la section aval; et la ligne d'eau, à cet instant, détermine le volume résiduel inutilisable.

L'étude des lignes d'eau est ici faite graphiquement suivant une méthode dérivée de Saint-Venant en ce qui concerne l'état initial et de M. CRAYA pour le régime variable.

Subterranean tunnels can be used as compensating reservoirs during periods of low water. What is the volume usable in practice? At peak periods the turbine discharge is much higher than the inflowing discharge and, by discharging, the water in the tunnel progressively reaches a state of free surface flow. The time comes when critical regime is reached in the downstream section and, at this moment, the water level profile determines the unusable residual volume.

A graphical study of the water level profiles is given here in accordance with methods derived from Saint-Venant and M. CRAYA for the initial state and the variable regime respectively.

INTRODUCTION

Lorsqu'on dispose dans une installation hydro-électrique d'une galerie d'amenée suffisamment importante, il est intéressant, en période d'étiage, d'utiliser le volume de cette galerie pour accumuler l'eau pendant les heures creuses, de façon à turbiner en heures pleines un débit supérieur au débit d'apport. Une telle exploitation améliore la production d'énergie :

- En la concentrant sur les heures où les besoins de la consommation sont les plus grands,
- En augmentant le rendement des groupes qui, au fil de l'eau, fonctionneraient à une faible fraction de leur puissance nominale.

Ce procédé a déjà été employé assez souvent et l'on sait qu'il pose un certain nombre de problèmes : télétransmission des niveaux, automatisme éventuel, tenue des galeries soumises à un marnage bi-quotidien, entraînement d'air et formation de poches d'air, et enfin, détermination du volume réel utilisable en galerie. C'est à ce dernier problème que nous nous sommes intéressés.

S'il est, en effet, relativement simple, dans une usine en exploitation, de déterminer empiriquement ce volume, les normes actuellement en vigueur à E.D.F. pour fixer la valeur économique des chutes en vue de l'établissement d'un programme, tiennent compte, non seulement de

l'énergie productible, mais également de la puissance garantie et de la puissance de pointe. Or, on ne peut déterminer la valeur de ces dernières que si l'on connaît avec une approximation suffisante le volume de la réserve.

Voyons donc qualitativement ce qui se passe lorsqu'on utilise une galerie en réserve de pointe (fig. 1). La galerie étant supposée pleine et le débit turbiné égal au débit d'apport q , si l'on porte à un instant donné le débit turbiné à une valeur Q supérieure à q , le plan d'eau baissera dans la galerie, il s'établira peu à peu une ligne d'eau

lerons volume résiduel V_r , le volume compris entre cette ligne d'eau et la ligne d'eau en régime normal correspondant au débit q .

Par ailleurs, il est bien évident que l'exploitant de l'usine ne se permettra pas de turbiner le débit Q jusqu'à l'apparition du régime critique dans la section aval de la galerie. Il commencera à réduire ce débit pour le ramener plus ou moins vite à q , ou à une valeur nulle, un certain temps auparavant, d'où un autre volume inutilisable. Pratiquement, ce volume V_s peut être pris égal à 10 minutes de marche à débit maximum.

FIG. 1. — Vidange d'une galerie.

mobile se raccordant vers l'amont à la ligne d'eau normale correspondant au débit d'apport q et rejoignant à l'aval le ciel de la galerie.

Lorsque cette ligne d'eau découvrira le sommet de la portion aval de la galerie, on sera ramené à un problème d'écluse en canal, et on pourra maintenir le débit turbiné à la valeur Q jusqu'à ce qu'apparaisse à l'aval de la galerie le régime critique correspondant au débit Q . La ligne d'eau que l'on obtient à ce moment-là dans la galerie délimite le volume inutilisable. En fait, pour des raisons de généralisation, nous appel-

Le volume dont on disposera pour l'écluse sera égal au volume total de la galerie, diminué de la somme du volume V_q déterminé par la ligne d'eau en régime normal correspondant à q , du volume V_r , et du volume V_s .

Les volumes V_q et V_s se calculent immédiatement lorsqu'on connaît les caractéristiques de la galerie, le débit d'apport et le débit turbiné. Nous avons cherché une méthode permettant de fixer au moins approximativement la valeur de V_r .

I. — MÉTHODE GÉNÉRALE

La méthode employée se décompose en trois parties :

- 1° Détermination de la ligne d'eau au moment où elle découvre entièrement le ciel de la galerie : nous l'appellerons ligne d'eau initiale;
- 2° Etude du mouvement transitoire à écoulement libre jusqu'à l'apparition du régime critique;

- 3° Essai de généralisation des résultats obtenus.

A. — LIGNE D'EAU INITIALE.

Si l'on suppose la galerie suffisamment longue pour qu'à un instant t les perturbations, dues à la mise en régime, ne soient plus sensibles sur la ligne d'eau, les conditions aux limites de l'écou-

lement seront alors les mêmes que celles que l'on aura à un instant $t + \Delta t$ ultérieur. Par conséquent, la ligne d'eau aura la même forme à l'instant $t + \Delta t$ et se sera déplacée d'une longueur Δx .

En écrivant les équations de continuité, on se rend compte que :

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v$$

est constant et égal à :

$$\frac{Q - q}{\Omega - \omega_0}$$

Ω désignant la section de la galerie et ω_0 la section occupée par l'écoulement normal correspondant au débit q (voir fig. 1).

Si l'on se place maintenant dans des axes mobiles se déplaçant parallèlement à la galerie à la vitesse v , on voit que le débit traversant une section ω quelconque sera égal à $q - \omega_0 v$. La ligne d'eau par rapport à ces deux axes sera donc une courbe de remous correspondant au débit $q - \omega_0 v$, avec cette différence qu'en chaque section ω les pertes de charge à prendre en compte seront celles qui correspondront à la vitesse réelle, c'est-à-dire :

$$v + \frac{q - v \omega_0}{\omega}$$

Ce raisonnement rapide, qui pourrait ne pas satisfaire les mathématiciens, peut être repris à partir des équations de SAINT-VENANT, qui définissent bien le mouvement dans toute la région en écoulement libre et qui sont, dans les axes fixes :

$$\frac{\partial h}{\partial x} = i - \frac{\lambda n^2}{8 g R} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{n^2}{2 g} \right) - \frac{1}{g} \frac{\partial n}{\partial t} \quad (\text{dynamique}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\omega n) = 0 \quad (\text{continuité}) \quad (2)$$

Après changement de variable et compte tenu de l'hypothèse de translation, les équations 1 et 2 deviennent dans les axes mobiles :

$$\frac{dh}{dX} = i - \frac{\lambda (U + v)^2}{8 g R} - \frac{d}{dX} \frac{U^2}{2 g} \quad (1')$$

$$U \omega = q - v \omega_0 \quad (2')$$

Par rapport aux axes mobiles (X), on a bien l'équation habituelle d'une courbe de remous avec la différence que l'évaluation des pertes de

charge doit inclure la vitesse supplémentaire constante v .

B. -- ETUDE DU RÉGIME TRANSITOIRE.

La ligne d'eau initiale étant établie comme on vient de le voir, il est possible d'étudier le régime transitoire jusqu'à l'apparition de la hauteur critique dans la section aval de la galerie par une méthode graphique. Nous avons choisi pour ce faire la méthode proposée par M. CRAYA, qui est à notre avis la plus simple et la plus précise que nous connaissions à l'heure actuelle, pour l'étude d'un phénomène faisant intervenir d'importantes variations du plan d'eau. Nous ne rappellerons pas ici cette méthode qui a été exposée par M. CRAYA dans la *Houille Blanche* en 1946.

C. -- ESSAI DE GÉNÉRALISATION.

Les deux opérations précédentes permettent donc, dans un cas particulier, de résoudre le problème. Cependant, si la détermination de la ligne initiale est assez rapide, la conduite de l'épure CRAYA, par contre, est assez longue. Il est donc intéressant de chercher à généraliser les résultats trouvés sur quelques épures, pour pouvoir les appliquer à un nombre de cas plus importants.

On admettra :

- 1° Que toutes les galeries auxquelles on s'intéresse ont la même forme de section;
- 2° Que la galerie est suffisamment longue pour que la ligne d'eau initiale se raccorde au régime uniforme amont à l'intérieur même de la galerie.

Les paramètres qui interviennent dans le phénomène sont :

- le débit d'apport q ,
- le débit turbiné Q ,
- une longueur caractéristique de la section D ,
- la pesanteur g ,
- le coefficient de perte de charge λ ,
- la pente de la galerie i ,
et, bien entendu,
- le volume résiduel V_r .

L'application du théorème de VASHY nous permet de transformer la relation :

$$F(Q, q, D, g, \lambda, i, V_r) = 0$$

faisant intervenir 7 paramètres en une relation

ne faisant plus intervenir que $7 - 2 (*) = 5$, paramètres sans dimension.

Une telle relation peut être, par exemple, de la forme :

$$F\left(\frac{Q^2}{g D^5}, \frac{V_r}{D^3}, \frac{Q}{q}, \lambda, i\right) = 0$$

De plus, la recherche des conditions de similitude à partir des équations du phénomène montre que les échelles des deux paramètres :

$$\frac{V_r i}{D^3} = \beta \quad \text{et} \quad \frac{Q^2}{D^5} = \alpha$$

sont égales à l'unité.

Dans ces conditions, un point figuratif α, β restera inchangé lorsqu'on modifiera les diverses échelles de telle sorte que les conditions de similitude soient vérifiées, c'est-à-dire, en particulier lorsque λ/i restera constant. L'équation caractéristique du volume résiduel sera donc de la forme :

$$F'\left(\alpha, \beta, \frac{Q}{q}, \frac{\lambda}{i}\right) = 0$$

Un raisonnement analogue permet de dire que le volume initial V_i , situé au-dessus de la ligne d'écoulement normal, au débit (q), sera donné par une relation de la forme :

$$G\left(\alpha, \beta_i, \frac{Q}{q}, \frac{\lambda}{i}\right) = 0$$

avec :

$$\beta_i = \frac{V_i \cdot i}{D^3}$$

Si donc on fait un certain nombre d'épures correspondant à une valeur donnée de Q/q et une valeur donnée λ/i , on pourra tracer les deux courbes :

$$F_I(\alpha, \beta) = 0$$

$$G_I(\alpha, \beta_i) = 0$$

On peut également montrer, en faisant tendre α et β vers 0, mais en maintenant Q/D constant,

que la courbe $\alpha(\beta)$ se trouvera, en coordonnées logarithmiques, à droite d'une droite correspondant à $\alpha = K \beta^{3/2}$, tant que les valeurs de β ne seront pas trop grandes.

Une telle courbe $\alpha(\beta)$ est représentée sur la figure 2, ainsi d'ailleurs que la courbe $\alpha(\beta_i)$.

On pourra donc, dans le cas d'une forme de section donnée pour la galerie, établir, pour chaque valeur de Q/q , un abaque où figureront diverses courbes $\alpha(\beta)$, correspondant chacune à une valeur donnée de λ/i .

Bien entendu, il existe des limitations pratiques aux variations des paramètres, à celle de α en particulier. Nous en dirons quelques mots dans l'exposé de l'application que nous avons faite de la méthode.

FIG. 2. — Courbes $\alpha(\beta)$ et $\alpha(\beta_i)$ dans le cas où $Q/q = 5$ et $\lambda/i = 10$

(*) 2 et non 3 puisque la masse n'intervient pas dans les équations du phénomène.

II. — APPLICATION

A. — HYPOTHÈSES PARTICULIÈRES.

Pour les cas qui ont été étudiés, les hypothèses sont les suivantes :

1° La galerie est revêtue.

La rugosité de la paroi a été caractérisée par un coefficient de STRICKLER $K = 65$.

2° Pour des raisons de facilité, la section a été choisie carrée. Ce cas est voisin de celui de la section en fer à cheval, dont la partie inférieure est un trapèze peu évasé.

3° La pente constante est de 2 ‰, valeur élevée qui conduit à un volume résiduel relativement faible.

4° L'aire de la section est de 16 m², valeur moyenne qui permettra de couvrir facilement par généralisation l'échelle des valeurs usuelles (5 à 30 m²).

5° Le rapport des débits d'apport et de pointe est de 1/5. C'est une limite inférieure qui correspond à la concentration maximum des apports quotidiens sur les heures de pointe, cas très fréquent. Le débit de pointe a été pris successivement de 10 - 20 - 32 m³/s (vitesses moyennes habituelles).

6° La longueur de la galerie est supérieure à celle du pseudo-remous, qui peut ainsi s'établir entièrement (hypothèse générale précisée antérieurement).

B. — CONDITIONS INITIALES.

1° *Construction graphique de la courbe initiale :*

L'équation de la ligne d'eau initiale s'écrit aux différences finies :

$$i - \frac{\lambda (U + v)^2}{8 g R} = \frac{\Delta \left(h + \frac{U^2}{2g} \right)}{\Delta X}$$

SCHOKLITCH (anciennement) et BLACKMORE (récemment dans *Water Power*) ont donné une solution graphique facilement applicable à cette équation (fig. 3).

2° *Cas d'un ressaut à l'amont :*

La ligne d'eau se raccorde tangentiellement au niveau normal amont, sauf si le régime amont est torrentiel, auquel cas il y a ressaut. L'em-

placement du ressaut est déterminé à l'aide de la fonction M DE BAKMETTEFF :

$M = \frac{q^2}{\omega g} + \omega p$ (p : pression moyenne dans la section d'aire ω considérée.).

Fig. 3. — Principe de construction de la courbe initiale. Cas d'un ressaut amont.

3° *Exemples :*

Dans les cas traités, il n'y a pas ressaut. La forme rectangulaire de la section à écoulement libre simplifie le calcul de j en fonction de h . Considérons, par exemple, le cas moyen pour lequel le débit aval $Q = 20$ m³/s. A l'amont ($q = 4$ m³/s) le niveau normal est $h = 0,585$ m.

d'où :

$$\omega_0 = 2,34 \text{ m}^2$$

et :

$$v = 1,17 \text{ m/s}$$

donc :

$$q_x = 1,26 \text{ m}^3/\text{s}$$

(débit par rapport aux axes mobiles).

Les intervalles Δx sont successivement de 100 m, 50 m et 20 m. Les graphiques obtenus

sont les suivants (fig. 4) et permettent de tracer la courbe initiale correspondante.

FIG. 4. — Construction de la ligne d'eau initiale
débit amont $q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$
débit aval $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$

C. — ÉPURES ET LIGNES D'EAU.

1° Graphiques préliminaires :

Dans le diagramme (U, V) les équations des courbes limites (débit amont et aval) sont pour l'exemple considéré :

à l'aval $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $U = 49/V^2$
à l'amont $q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$, d'où $U = 9,8/V^2$

La courbe traduisant la ligne d'eau initiale est située entre les deux précédentes, et construite par points comme on l'a vu. La zone du diagramme utile à l'épure est ainsi parfaitement déterminée.

- Dans le diagramme xt , les points initiaux ($t = 0$) sur l'axe des x , sont inutiles parce qu'on se limite à la caractéristique montante, issue du point d'origine ($x = t = 0$).
- Sur le diagramme auxiliaire (pentes et pertes de charge), les courbes $j = \text{constante}$ ont été tracées de 10^{-4} en 10^{-4} .

2° Réalisation de l'épure :

Les intervalles de temps adoptés étaient initialement de 20 à 30 secondes, mais ont été réduits à 10 et même 5 secondes pour améliorer la précision (le nombre de points de l'épure approche souvent un millier).

L'épure sera terminée lors de l'apparition du régime critique dans la section aval. Il reste alors à compléter les diagrammes, de façon à connaître les états simultanés de l'écoulement dans les sections amont à cet instant final.

Finalement, les trois diagrammes complets obtenus dans l'exemple $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ sont figurés ci-contre (fig. 5, 6, 7).

3° Tracé des lignes d'eau :

Le tracé des lignes d'eau à divers instants t donnés, à partir des diagrammes précédents, nécessite des interpolations dans l'espace et dans le temps qui sont faites linéairement et leur précision est d'autant meilleure que le Δt choisi est plus faible.

Dans le cas particulier moyen traité $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, on obtient les lignes d'eau successivement figurées sur le graphique ci-contre (fig. 8). Les courbes présentées sont réalisées successivement au temps 0,300 s, 450 s et 600 s.

4° Vérification :

Le planimétrage combiné au calcul permet à chaque instant de suivre le phénomène avec précision et de déceler en temps utile les erreurs.

La vidange à débit Q ayant une durée connue (diagramme x, t) à partir de l'instant où s'établit la courbe initiale, il s'est écoulé de la galerie pendant ce temps un volume $(Q - q) t \text{ m}^3$.

Par ailleurs, le volume compris entre les lignes d'eau initiale (pseudo-remous) et finale (passage en critique) représente également le volume tiré de la galerie et peut être évalué par planimétrie.

D'après la construction des épures, il semble, sans qu'on puisse l'affirmer, que le volume turbiné soit obtenu par excès à partir de la durée

de vidange, et par défaut à partir des lignes d'eau.

La valeur exacte serait donc comprise entre les deux précédentes, et en général l'erreur relative sur le volume turbiné ne dépasse pas quelques % (voir résultats) et est d'autant plus faible que Δt est plus petit.

D. --- RÉSULTATS.

1° Résultats numériques :

Trois épures ont été effectuées dans les conditions précisées précédemment.

On appelle :

Volume initial, celui compris entre la ligne d'eau de départ et la ligne d'écoulement normal du débit amont;

FIG. 5. --- Diagramme (U, V).

— Volume résiduel, celui compris entre la ligne d'eau de départ et la ligne d'eau finale.

Etudes	Débit aval m ³ /s	Débit amont m ³ /s	Durée vidange s	Volume initial m ³	Volume m ³ résiduel
I	10	2	1.600	13.700	1.700
II	20	4	600	14.100	4.700
III	32	6,4	280	16.700	9.700

Dans l'épure I, la plus longue, le Δt est trois à quatre fois plus grand que dans les épures II et III, aussi la précision est-elle moins bonne.

2° Extension particulière :

Dans l'étude III ($Q = 32 \text{ m}^3/\text{s}$), le rapport 1/5 des débits amont et aval est aussi celui des sec-

tions ω_0 (niveau normal amont) et Ω (pleine section).

Par conséquent, la vitesse U par rapport aux axes mobiles (X) est nulle, et la vitesse u par rapport aux axes fixes (x) est constante et égale à v . Donc, si l'on modifie simultanément λ , Q et q de façon que λv^2 reste constant, V_i reste le même, ce qui présente l'intérêt suivant :

- Dans le diagramme (U, V) la courbe initiale est alors la droite d'équation $U = v = \text{Cte}$, et la construction de la ligne d'eau initiale le long de la galerie devient inutile;
- Dans les axes (α, β) et pour λv^2 constant, $\alpha = Q^2/D^5$ varie avec Q , mais $\beta_i = V_i \cdot i/D^3$ reste le même.

Donc, à tout point de la verticale β_i est associée par l'intermédiaire de α , une valeur de Q , donc de λ et λ/i . Par suite, les courbes $\alpha(\beta_i)$ pour des valeurs croissantes de λ/i coupent de plus en plus bas la verticale β_i et sont situées de plus en plus à droite de la courbe $\alpha(\beta_i)$ pour λ/i minimum (en fait celle construite).

FIG. 6. — Diagramme (x, t).

La zone des courbes $\alpha(\beta_i)$ dans l'abaque ($Q/q = 5$) est donc assez réduite.

3° Généralisation :

Essayons maintenant de localiser sur l'abaque la zone des courbes $\alpha(\beta)$. Les vitesses en galerie à pleine section varient pratiquement de 0,50 m/s à 3 m/s, et les diamètres de 2 à 7 m. Donc α ne pourra être inférieur à 0,07. Le cas représenté

sur la figure correspond à λ/i peu différent de 10. Les courbes $\alpha(\beta)$ correspondant toujours à la même valeur de Q/q , mais à des valeurs de $\lambda/i > 10$, se trouveront à droite de la courbe tracée et le domaine intéressant du diagramme deviendra de plus en plus restreint au fur et à mesure que λ/i croîtra.

Ces considérations permettent de choisir au mieux les épures à faire pour compléter le pré-

FIG. 7. — Diagramme auxiliaire. — Pente et pertes de charge.

FIG. 8. — Lignes d'eau successives au cours de la vidange.

$$Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$$

sent abaque correspondant à $Q/q = 5$. Il restera ensuite à faire varier Q/q . Mais il est déjà possible de prévoir des ordres de grandeur à partir des résultats précédents.

Exemple

Dans le cas de la chute de Valabres, où l'utilisation de la réserve en galerie est prévue, on a les caractéristiques suivantes :

- Section en fer à cheval;
- Pente constante 1,25 ‰;
- Longueur 6.600 m suffisante pour l'établissement de la ligne d'eau initiale;
- Rapport des débits $Q/q \sim 4,5$ (donc peu différent de 5) avec $Q \sim 16 \text{ m}^3/\text{s}$.

— Supposons d'abord la galerie revêtue $\Omega = 13 \text{ m}^2$. Avec $K \sim 80$, ce qui est concevable, on

a $\lambda/i \sim 10$, d'où, pour $Q^2/D^5 = 0,4$, on lit sur l'abaque :

$$\frac{i V_i}{D^3} = 0,45 \text{ et } V_i = 17.000 \text{ m}^3$$

$$\frac{i V_r}{D^3} = 0,14 \text{ et } V_r = 5.000 \text{ m}^3$$

— Si l'on admet maintenant que la galerie est brute, avec radier seul revêtu :

$$\Omega = 16 \text{ m}^2, \text{ d'où } Q^2/D^5 = 0,25$$

Comme, pour $K \sim 35$, on a $\lambda/i \sim 50$, on peut écrire :

$$i V_i/D^3 > 0,52, \text{ soit } V_i > 27.000 \text{ m}^3.$$

V_r ne pourra être déterminé que lorsqu'on aura complété l'abaque, mais il ne serait pas étonnant qu'il atteigne 10.000 m^3 .

DISCUSSION

(Président : M. HUPNER)

M. le Président indique que le travail de MM. LABAYE et DURANTON est le résultat de plusieurs mois de recherches savantes et présente un très grand intérêt pratique.

M. MEYER souligne l'intérêt de cette étude, déduite des travaux de M. CRAYA, sur les régimes variables.

M. MEYER demande si l'on ne pourrait pas tirer de ces études certaines conclusions intuitives sur les diffé-

rences entre les résultats obtenus à partir des épures CRAYA et ceux obtenus à partir des équations linéaires, et ceci en particulier pour des variations brusques du débit aval, cas voisin de celui traité ici.

M. LABAYE dit qu'il n'a pas essayé d'appliquer le calcul linéarisé, et ne voit pas *a priori* les résultats qu'on aurait pu en tirer, car l'équation de SAINT-VENANT n'est pas très commode à manier. D'autre part, il pré-

cise que, dans le cas étudié, il n'y avait pas de variations brusques de débit à l'aval, mais simplement un abaissement de la ligne d'eau consécutif à la vidange de la galerie.

En réponse à la question posée par M. MEYER, M. RÉMÉNÉAS indique qu'il a eu l'occasion d'étudier en 1942, au Laboratoire de Beauvert, de la Société Hydrotechnique de France, un problème analogue concernant l'utilisation des canaux à écoulement libre comme réservoir d'écluse; les lignes d'eau au début et en fin d'écluse avaient été calculées, dans un certain nombre de cas particuliers, au moyen d'une méthode graphique de calcul des écoulements non permanents mise au point par le Laboratoire. Cette étude ne pouvait évidemment aboutir à des conclusions très précises; elle a montré que toutes les dispositions qui tendent à augmenter l'emprise d'un remous d'exhaussement ou d'abaissement dans le canal (faible pente du radier, perte de charge réduite, etc.) sont favorables à l'augmentation de la réserve d'écluse, toutes choses égales d'ailleurs. Pour une même surface de la section mouillée en régime uniforme, les profils en travers de grande profondeur sont plus favorables que les sections de faible tirant d'eau.

M. LABAYE dit que l'intérêt de l'étude est que les courbes déterminées à partir des valeurs de λ et i , choisies de manière à réduire au maximum les dimensions de l'épure, sont valables pour les cas courants où les valeurs de λ et i sont différentes des précédentes, mais telles que λ/i soit le même.

M. le Président se demande si le problème de l'exploitation hydroélectrique du barrage de Poses, sur la Basse-Seine, qui s'était posé il y a quelque vingt-cinq ans, n'est pas analogue à celui traité par M. LABAYE, notamment dans le cas du passage à la limite ($D = \infty$) : le bief de Poses a 42 km de long et le lit une pente moyenne de 1/10.000; tout à fait à l'amont, au pied du barrage de Port-Mort, la ligne d'eau atteint une limite telle que, lorsque le débit de la Seine croît à partir de l'étiage, la cote de retenue à Poses doit être baissée progressivement, de manière à respecter la limite imposée tout à fait à l'amont par la sécurité des riverains. En vue de l'exploitation hydro-électrique de la retenue M. GENTHIAL avait déterminé expérimentalement le profil du plan d'eau, en plaçant tous les cinq cents mètres des observateurs munis de chronomètres qui notaient le niveau instantané de la Seine en fonction de l'ouverture des rideaux du barrage de Poses.

M. le Président ajoute que l'étude faite pour Poses pourrait sans doute être retrouvée dans les archives de M. BLOSSET, relatives à la demande de concession faite à l'époque par la Compagnie Centrale d'Énergie Électrique.

M. LABAYE confirme que le problème des éclusées en canal ou en fleuve navigable pourrait être traité suivant un procédé analogue à celui qu'il vient d'exposer pour les galeries souterraines, mais qu'il n'a pas encore étudié : des essais sont en cours au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique pour le projet des usines en chaîne de Jouques et Saint-Estève : on pourrait peut-être, à partir de ces essais, tenter une généralisation des procédés graphiques.

M. le Président demande si les machines modernes de calcul permettraient de résoudre ce problème plus rapidement que les procédés graphiques.

M. LABAYE estime que les machines du type « analogique » permettraient, sans doute, de réduire le temps de travail. Il croit savoir d'ailleurs que M. CRAYA s'intéresse à ce problème.

Sur la demande de M. le Président, M. CHEVRIER confirme que l'exploitation des usines par éclusées augmente d'une manière importante leur valeur économique par rapport à l'écoulement libre; mais M. CHEVRIER craint que ces alternances de mises en charge et de décharges successives ne soient dommageables aux revêtements des galeries; aussi la Direction de l'Exploitation d'E.D.F. ne pourra-t-elle envisager ce genre d'exploitation qu'après en avoir étudié toutes ses conséquences sur la tenue des revêtements.

M. le Président rappelle que l'utilisation de l'eau contenue dans la conduite forcée et dans le dernier tronçon de galerie a rendu service dans les premiers temps de l'exploitation de la chute de Malgovert, avant l'utilisation de la réserve de Tignes, pour les premiers essais d'un groupe.

M. le Président ayant suggéré une adaptation du profil en long de la galerie, M. LABAYE indique qu'une accentuation de la pente vers l'aval permet une réduction du volume résiduel, mais tend à diminuer la hauteur de chute nette; c'est un problème d'optimum.

M. CHEVRIER ajoute que les temps de fonctionnement des usines obtenus par les divers procédés de ce genre sont en rapport avec les plus courtes pointes (1/4 d'heure) que la synchronisation actuelle des usines permet de prendre en considération.

M. AILLERET indique que la durée intéressante des pointes qui ressort des récentes enquêtes est de l'ordre de 3/4 d'heure; sur le plan européen, par le jeu de l'interconnexion, on peut admettre que cette pointe s'étalerait sur l'échelle de la demi-heure; d'autre part, les maxima des séries de ces puissances critiques sont de 3/4 d'heure ou 1 heure. Comme ces puissances critiques se payent assez cher (30.000 F le kW environ), il semble que l'utilisation des galeries comme réservoir d'éclusées serait assez intéressante et compenserait largement les frais d'entretien, l'étude d'un meilleur revêtement et même les tracés et les profils en travers spéciaux des galeries.

Sur la demande de M. VARLET, M. AILLERET précise que ces puissances critiques de 3/4 d'heure à 1 heure se produisent deux fois par jour en hiver, vers 8 heures et 18 heures, et interviennent dans le système allemand de pompage journalier qui permet de prendre en charge ces puissances intéressantes.

M. VARLET rappelle qu'il y a trois ou quatre ans, à l'époque de la pénurie hydraulique, quand on avait fait donner des usines à éclusées pendant 3/4 d'heure ou 1 heure, on était complètement à bout de souffle.

Sur la demande de M. VARLET, MM. LABAYE et DURANTON précisent que dans l'exemple cité, $V_i = 27.000 \text{ m}^3$ représente le volume initial (« à la clé ») et $V_r \sim 10.000 \text{ m}^3$ le volume résiduel (à la fin), et qu'en plus de $V_i - V_r$, on dispose de tout le volume situé dans la galerie au-dessus de la ligne d'eau dite « initiale » : en fait l'exploitant arrêtera lorsqu'on sera très près de la courbe initiale (qui détermine V_i). Dans le cas d'une galerie à pente faible et à perte de charge forte, la courbe de remous sera plus longue, et les volumes V_i et V_r seront relativement plus importants.

M. VARLET demande alors quel est le volume supplémentaire à ajouter entre l'instant où la galerie est pleine et l'instant initial, pour évaluer l'intérêt qu'il y aura à exploiter la galerie en éclusée et à partir de quel moment.

M. LABAYE dit que le volume total de la galerie étudiée

est de l'ordre de 100.000 m³: il s'agit de savoir les dimensions que l'on donnera à un bassin de tête prolongeant la galerie. On dispose d'un volume total de 100.000 m³ en galerie, moins le volume dû à l'écoulement normal du débit amont de 23.000 m³, moins le volume résiduel de l'éclusee probablement supérieur à 10.000 m³, moins le volume de sécurité de 7.000 m³, soit en définitive : 100.000 — 40.000 = 60.000 m³. Comme on a besoin, pour assurer la pointe, de 12.000 m³, il faudrait donc construire un bassin extérieur de l'ordre de 60.000 m³.

M. VARLET pense que ce calcul est plutôt destiné au projet (section et revêtement de la galerie) qu'à l'exploitation.

M. LABAYE indique que dans l'établissement des projets intervient la puissance de pointe disponible qui ne peut être calculée que si l'on connaît le volume utilisable en éclusee.

M. le Président demande quelle va être la puissance installée à Valabres et ce qu'elle serait si on n'appliquait pas cette méthode d'éclusees.

M. LABAYE répond que la puissance installée sera la même, mais avec une possibilité accrue de faire face aux pointes aux heures critiques.

M. RÉMÉNIÉRAS fait remarquer :

1° Que dans le cas d'un canal à écoulement libre à ciel

ouvert, le volume total de l'éclusee est égal à celui compris entre les plans d'eau au début et à la fin de la dite éclusee. La ligne d'eau au début de l'éclusee sera souvent une ligne de remous d'exhaussement. En fin d'éclusee le régime permanent ne sera pas forcément atteint mais la ligne d'eau sera liée au tirant d'eau critique qui s'établira, pour le débit d'éclusee considéré, vers l'extrémité aval du canal.

2° En pratique on appelle souvent durée d'éclusee d'une usine toute la période pendant laquelle celle-ci peut prélever à l'aval de son canal d'amenée un débit supérieur à celui qui arrive à l'extrémité amont de ce canal. Du fait de l'établissement du tirant d'eau critique comme il est dit ci-dessus, l'éclusee ainsi définie comporte généralement deux périodes :

a) Une période de « pleine éclusee » où l'usine absorbe par exemple son débit de pleine charge;

b) Une période de « queue d'éclusee » où elle ne peut absorber qu'un débit décroissant progressivement depuis le débit de pleine charge ci-dessus jusqu'au débit arrivant à l'extrémité amont du canal.

M. le Président souligne l'intérêt que donnent à l'exposé le nombre important et les domaines variés des questions posées.