

NOTULES HYDRAULIQUES
HYDRAULIC BRIEFS

Détermination graphique de la ligne d'eau et calcul des remous

Graphic determination of back-water curves

English synopsis p. 312

Le procédé consiste à transcrire graphiquement l'équation de Bernouilli :

$$Y_0 + \frac{V_0^2}{2g} = Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + J$$

dans laquelle Y_0 et Y_1 sont les altitudes du plan d'eau dans deux sections Ω_0 et Ω_1 consécutives;

V_0 et V_1 : les vitesses dans ces sections,
 J : la perte de charge entre les deux sections.

Dans un cours d'eau naturel, par exemple, J dépend de tous les profils intermédiaires, mais on peut décomposer le cours d'eau en parties où

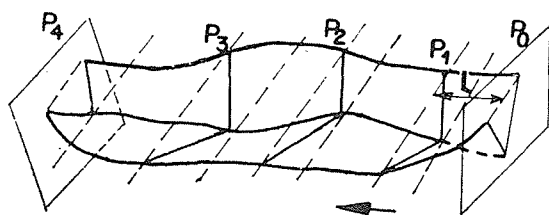


FIG. 1

la variation du profil est faible. Soit par exemple, représentée en perspective, la vallée entre les profils P_0 et P_4 .

Au lieu de prendre J entre P_0 et P_1 , nous prendrons pour le calcul des pertes de charge, pour la première moitié de la distance qui sépare P_0 et P_1 , la perte de charge correspondant au profil P_0 , et pour la deuxième moitié celle qui correspond au profil P_1 .

Les pertes de charge peuvent s'exprimer sous une forme qui est KV^2 , ce sera par exemple pour la première partie du trajet :

$$K_0 V_0^2 \frac{L}{2} ;$$

et, pour la deuxième :

$$K_1 V_1^2 \frac{L}{2} .$$

Ceci étant, l'équation de Bernouilli prend la forme :

$$Y_0 + \frac{V_0^2}{2g} - K_0 V_0^2 \frac{L}{2} = Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + K_1 V_1^2 \frac{L}{2} ;$$

ou en exprimant en fonction du débit :

$$Y_0 + Q^2 \left[\frac{1}{2g\Omega_0^2} - \frac{K_0 L}{2\Omega_0^2} \right] = Y_1 + Q^2 \left[\frac{1}{2g\Omega_1^2} + \frac{K_1 L}{2\Omega_1^2} \right]$$

Si pour chacun des profils P_0 et P_1 nous calculons pour diverses valeurs de l'altitude Y les quantités entre crochets que nous appellerons : caractéristique aval de P_0

$$= \frac{1}{2g\Omega_0^2} - \frac{K_0L}{2\Omega_0^3} = f'_0(Y)$$

caractéristique amont de P_1

$$= \frac{1}{2g\Omega_1^2} + \frac{K_1L}{2\Omega_1^3} = f_1(Y)$$

Nous pouvons tracer les courbes représentatives de la façon figurée ci-contre (fig. 2) en portant les valeurs de f'_0 et f_1 positivement dans le sens in-

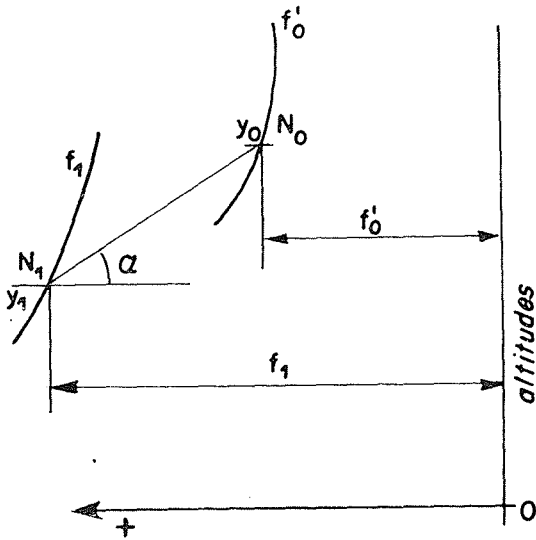


FIG. 2

diqué. Si l'eau se trouve à un niveau Y_0 au profil P_0 , elle ne peut être qu'à un niveau Y_1 sur le profil P_1 répondant à l'équation ci-dessus.

Joignons les points correspondants N_0 et N_1 ,

$$Y_0 - Y_1 = Q^2 [f_1 - f'_0],$$

c'est-à-dire que l'inclinaison de la droite N_0N_1 est telle que $\text{tg } \alpha = Q^2$.

Cette propriété permet de déterminer d'une façon très simple, pour un débit quelconque, les niveaux successifs si le niveau en un point du cours d'eau est connu, car il suffit de tracer les droites dont la pente est égale au carré du débit.

Et inversement, si deux niveaux consécutifs sont donnés, on trouve le débit correspondant, ce qui ne peut s'obtenir par le calcul sans de longs tâtonnements avec une cause grave d'erreur qui s'expliquera facilement par ce qui suit, si dans l'intervalle considéré existe une discontinuité dans l'écoulement.

En outre, si pour une crue jaugée on connaît le niveau en un seul point d'une rivière, on peut en déduire la hauteur atteinte en tous les points où passe le débit en question.

DIFFÉRENTS CAS DE FIGURE

Premier cas. — Les caractéristiques ne se coupent pas : $f_1 > f'_0$.

Elles peuvent être toutes les deux constamment positives ou l'une positive et l'autre négative, ou toutes deux négatives, c'est-à-dire ou du même côté de l'axe des coordonnées des altitudes, ou de part et d'autre.

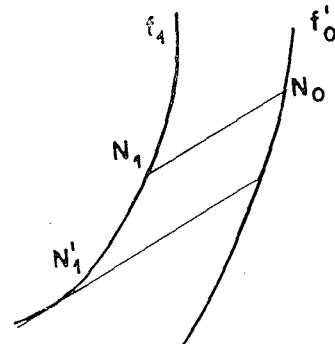


FIG. 3

Pour une même valeur du débit, il existe une infinité de niveaux compatibles, mais il y en a un au-dessous duquel aucune solution n'est possible, c'est celui où la droite N_1N_0 est tangente à la courbe f_1 par exemple.

Pour ce niveau N'_1 , on n'a plus d'énergie disponible dans le flux liquide autre que celle suffisant à l'écoulement. C'est la vitesse critique pour ce niveau.

Deuxième cas. — Les caractéristiques se coupent.

En dessus du point d'intersection : $Y_0 > Y_1$; en dessous : $Y_0 < Y_1$, il y a ressaut.

Pour comprendre ce qui se passe, examinons une succession de profils 0, 1, 2, 3, 4 (fig. 4).

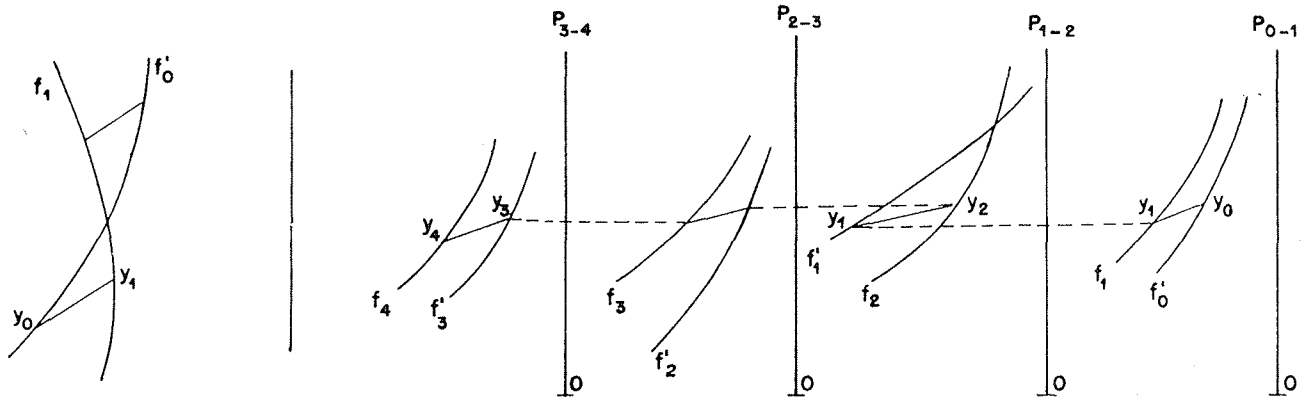


FIG. 4

On passera du niveau Y_0 au niveau Y_4 par quatre graphiques dont l'un présente la particularité ci-dessus. Cela veut dire que disposant d'un excès d'énergie cinétique en Y_0 (grande pente par exemple) celle-ci se retrouve en potentiel après le profil 1. Evidemment ce ressaut est en lui-même une perte d'énergie, et nous ne savons pas la quantité d'énergie perdue, mais si pour une raison quelconque le niveau Y_4 est connu (barrage

Le cas moyen est l'écoulement où l'énergie cinétique est exactement celle qui correspond au frottement.

Dans ce cas, les droites N_0N_1 sont tangentes aux courbes f_n . Cette remarque est très importante en ce sens que si l'on a, par exemple, une portion du cours d'eau contenant un ressaut et que sur une grande longueur, à l'amont ou à l'aval, ceci ne se présente pas, il y a à une certaine distance de cette zone un endroit où l'écoulement est très voisin de l'écoulement limité, et ceci permet de résoudre tout le problème en partant à l'aval des tangentes aux caractéristiques et à l'amont de la même façon.

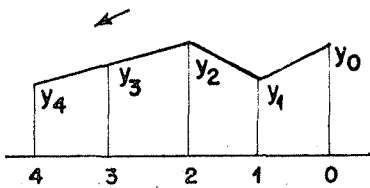


FIG. 5

par exemple, niveau de la mer, etc.) et que le niveau Y_0 soit fourni par une donnée quelconque, nous pouvons tracer le niveau de l'eau avec exactitude de Y_4 à Y_1 en remontant, et de Y_0 à Y_2 en descendant : on aura alors la ligne d'eau telle que figurée ci-contre (fig. 5), le point M étant déterminé avec une approximation bien suffisante en pratique (fig. 6).

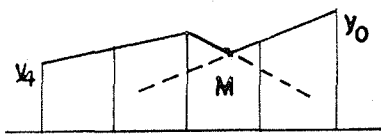


FIG. 6

De là, la notion des deux genres d'écoulement différents :

- a) écoulement commandé par l'amont (grande énergie cinétique);
- b) écoulement commandé par l'aval (faible énergie cinétique).

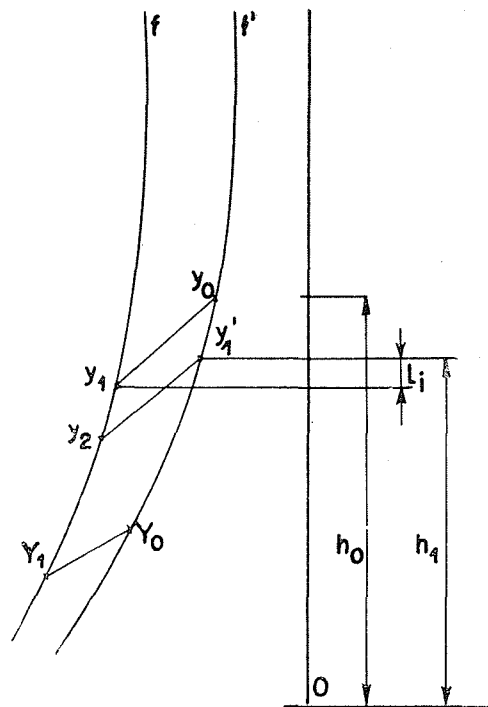


FIG. 7

CAS PARTICULIER
CANAL DE SECTION CONSTANTE

Pour chaque tronçon que l'on peut prendre de même longueur, les courbes f et f' sont toujours les mêmes, mais décalées de la longueur L séparant deux profils, multipliée par la pente i .

On peut cependant confondre toutes ces courbes en un seul graphique sous réserve de prendre certaines précautions en l'employant (fig. 7).

Partons d'un niveau Y_0 au profil P_0 avec un débit Q , nous arrivons à Y_1P_1 ; mais le fond du canal est en P_1 en dessous du fond P_0 de (Li). Pour passer à la section suivante, également distante de L , nous devrions utiliser un graphique où f' et f seraient descendus de Li , il suffira donc de remonter le point Y_1 de cette quantité sur la courbe f' pour continuer la recherche des points successifs (ici Y_2).

L'écoulement n'est uniforme (écoulement Bazin) que si, en faisant ce décalage, on retombe sur le point Y_0 . Dans ce cas, le graphique se réduit à la tangente Y_0Y_1 .

Cette méthode est commode pour étudier certains cas spéciaux comme le suivant.

EXEMPLE DU CANAL DE MANOSQUE

Le canal de Manosque est alimenté par la Durance et à son origine il y a un tunnel; celui-ci s'engrave à chaque période de hautes eaux; le niveau à l'amont est connu.

Pour obtenir le dégrèvement, nous avons préconisé de mettre quelques vannes latérales au long du tunnel, et, comme cela n'était guère possible, tout au moins une à l'extrémité du tunnel (fig. 8).

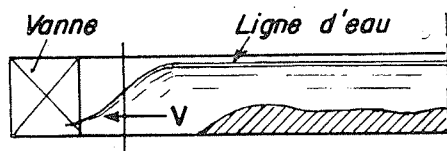


FIG. 8

En effet, si l'on ouvre cette vanne, la hauteur d'eau tombe à l'aval brusquement, l'écoulement est commandé alors par l'amont et on peut tracer la surface de l'eau par le procédé ci-dessus, en un certain point de la partie affaïssée la vitesse atteint une valeur qui correspond à la vitesse d'entraînement des graviers et ceci à l'aval de ces graviers. La méthode ci-dessus a permis de vérifier qu'une telle vitesse était possible, et le dégrèvement s'opère ainsi commodément par

une série d'affaissements artificiels de la nappe liquide alors que c'était autrefois une opération pénible et très longue, gênante pour les usagers du canal, qui s'opérait à la main.

EXEMPLE DU REMOUS DU BARRAGE DE CASTELNAU

Le barrage de Castelnaud, sur le Lot, est limité en hauteur par le bourg de Sainte-Eulalie situé à l'amont de sa retenue.

On n'avait que des renseignements très vagues sur les crues en cette région, mais celles-ci sont très importantes et il était absolument nécessaire d'éviter que le barrage puisse être une cause de surélévation du niveau du Lot au droit de Sainte-Eulalie.

Une crue a eu lieu durant les travaux, qui a pu être estimée, et pour cette crue, la pile d'un vieux pont romain située au milieu du Lot à Sainte-Eulalie avait été submergée d'une quantité approximative d'un mètre.

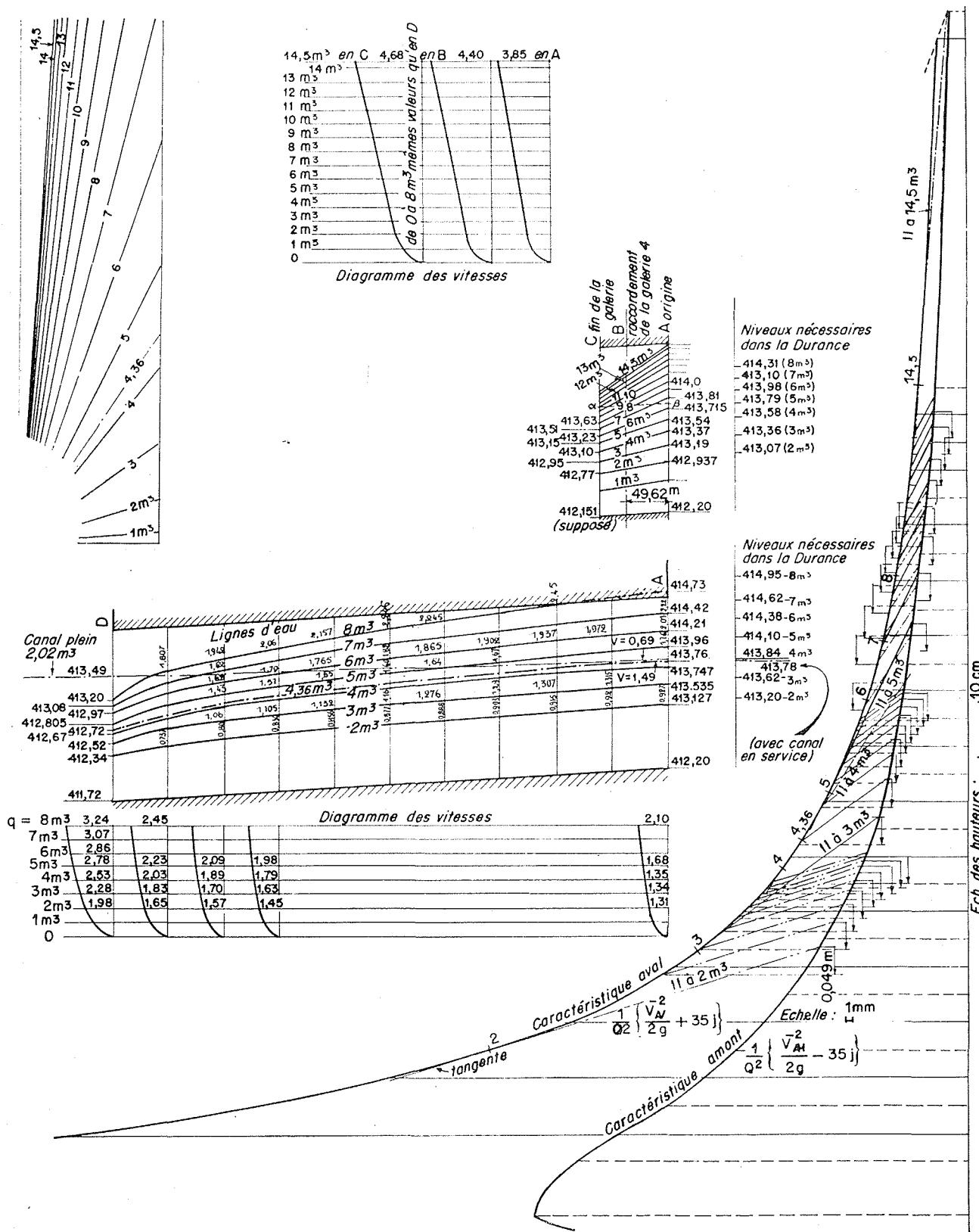
Ceci a permis de résoudre le problème; car il est superflu de dire que, les cours d'eau naturels ayant des fonds mobiles pratiquement impossibles à relever, la méthode précédente n'est applicable qu'à des valeurs de débit telles que la forme rigoureuse du fond ne change pratiquement rien aux coefficients divers dont on doit tenir compte. Il était impossible d'extrapoler les résultats que l'on aurait pu tirer des débits courants du Lot de 100 à 400 fois plus faibles.

Nous avons pris la formule de Bazin, avec le coefficient 1,30. Par la suite, l'exécution du long canal de fuite de l'usine par aménagement des berges du Lot nous a confirmé l'exactitude de ce coefficient (gros creux rocheux alternant avec des plages de cailloux).

On disposait de levés de la Société Française de Stéréotopographie dans toute la partie amont de la retenue.

Il a été repéré sur ce levé un certain nombre de sections du cours d'eau où la forme de la vallée pouvait être considérée comme variant peu. En particulier un léger resserrement de la vallée a coïncidé avec un des profils choisis.

Le tracé du remous s'est fait en partant de la cote de la retenue, non pas au barrage même, car on ne disposait que de profils pas très exacts dans la plus grande partie de la retenue, mais uniquement dans la partie amont; à 2 ou 3 centimètres près, cela donnait des résultats suffisants (c'est-à-dire bien au-delà de la précision nécessaire). Le resserrement provoquait, comme l'ont montré les graphiques, un ressaut; dès lors, l'écoulement a été étudié en repartant de l'amont et l'on a trouvé du reste un contrôle en utilisant la méthode des



PLANCHÉ I. — TUNNEL DE MANOSQUE. Étude des vitesses possibles en utilisant les fenêtres pour faire des purges.

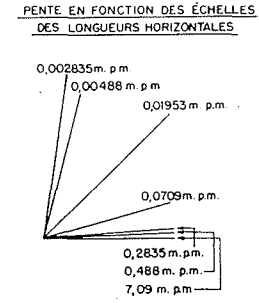
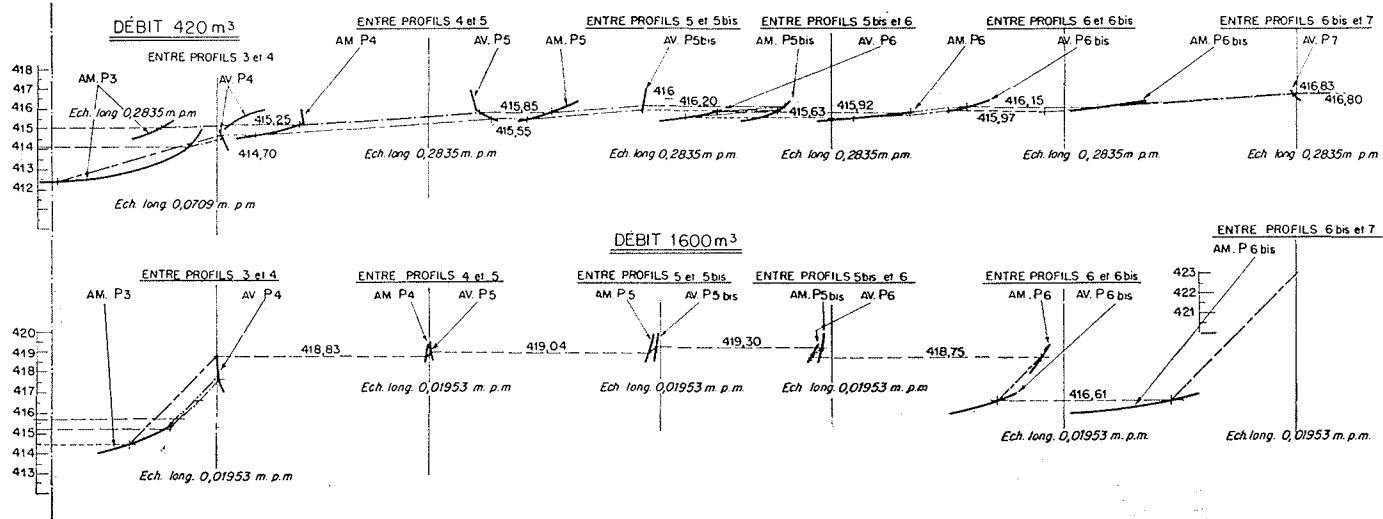
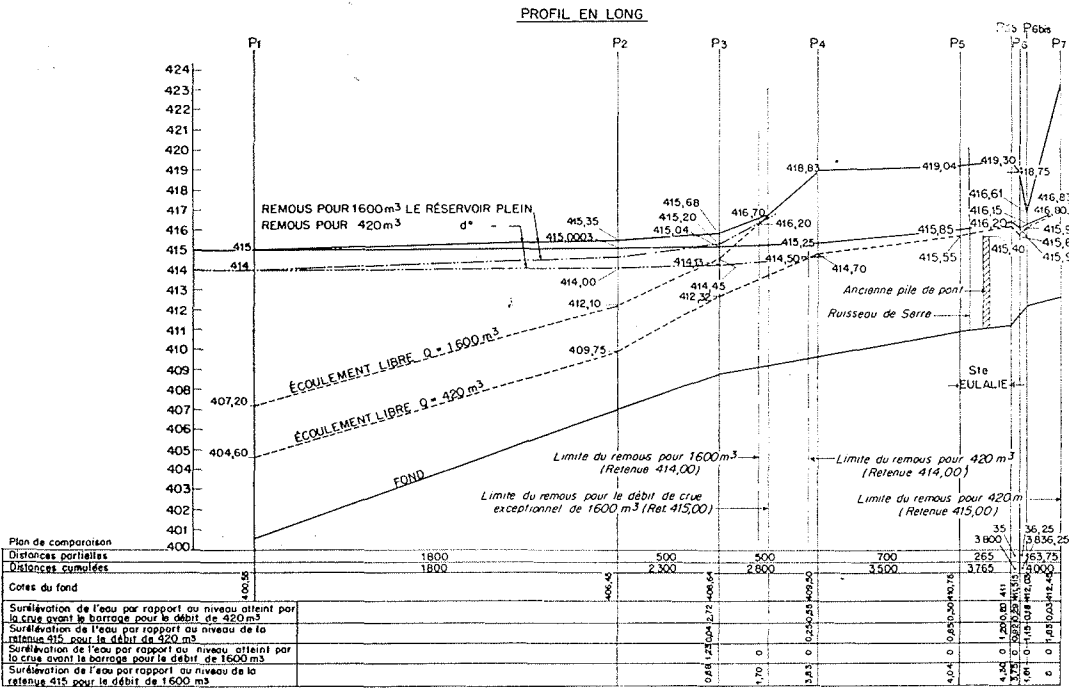
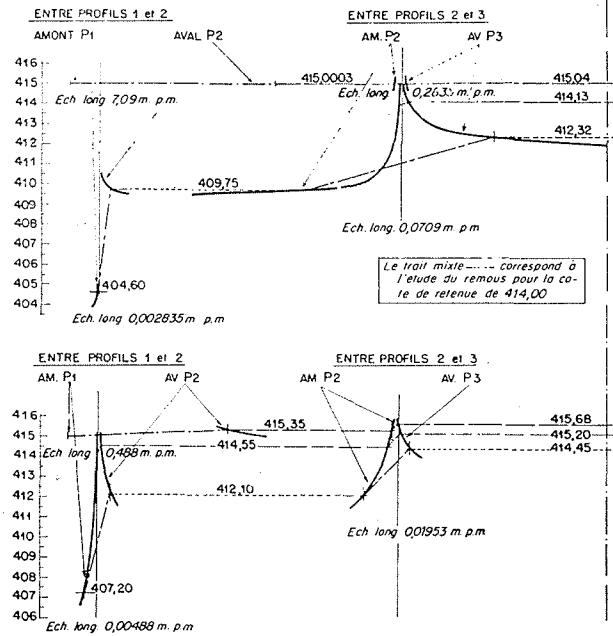


PLANCHE II. — USINE DE CASTELNAN-LASSOUTS. Etude du remous sur le Lot à l'amont du barrage.

tangentes en se plaçant assez à l'amont de Sainte-Eulalie; mais il y avait un ressaut juste avant l'entrée du Lot à Sainte-Eulalie, ce qui rendait ce contrôle incertain. Cependant ce résultat cadrerait avec la submersion de la vieille pile de pont romaine.

Le niveau, fixé à 415, ne pouvait avoir aucune répercussion, même pour les très fortes crues, sur l'écoulement de Sainte-Eulalie, puisque celui-ci restait toujours un écoulement commandé par l'amont, le remous du barrage créant un écoulement commandé par l'aval avec un ressaut de discontinuité entre les deux écoulements.

Ce ressaut n'existe pas pour des débits moyens et il en résulte une légère remontée du plan normal d'écoulement pour des débits moyens à Sainte-Eulalie, sans conséquence.

Le niveau a été cependant fixé à une cote inférieure pour répondre à quelques exigences locales. Sans doute le calcul des caractéristiques est un peu long, mais il n'est rien en comparaison du calcul habituel (tel qu'il figure, par exemple, dans le traité hydraulique de M. ESCANDE). Une fois fait, on peut étudier avec une grande facilité ce qui se passe pour n'importe quel débit : il suffit en effet de tracer quelques droites parallèles.

ECHELLES DES GRAPHIQUES

En général, on est gêné par cette question des échelles parce que les caractéristiques ont des formes souvent très aplaties ou trop droites, ce qui gêne, par exemple, pour le tracé des tangentes; ou encore on obtient des graphiques de trop grandes dimensions. Il est facile de rectifier cela en agissant sur l'échelle des coordonnées de f et f' en modifiant celle des débits :

soit $\frac{1}{m}$ l'échelle des Y
 $\frac{1}{n}$ l'échelle des f et f'
 $\frac{1}{P}$ celles des débits
 $P = \sqrt{\frac{m}{n}}$

APPLICATION A DES ÉVACUATEURS DE CRUES

Entrée en tunnel (fig. 9).

Cette méthode convient particulièrement bien pour ce problème, car elle permet de déterminer

l'affaissement de la nappe en fonction du frottement sur les parois et du profil en long du radier, et si l'on a quelques courbes dans le tracé en plan, il est possible de tenir compte

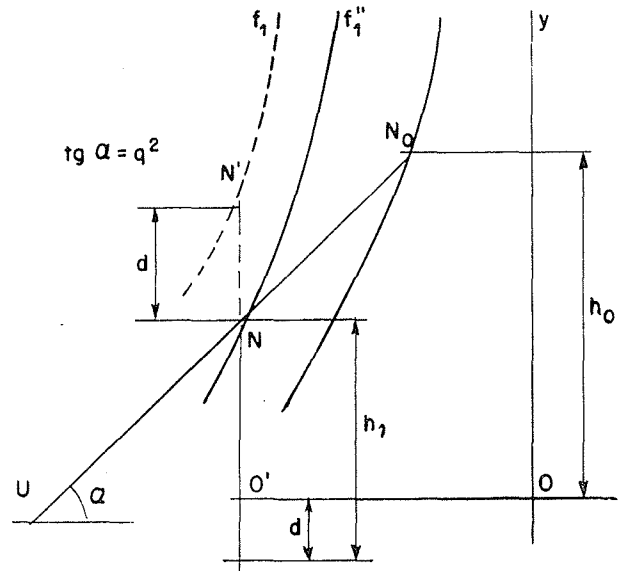


FIG. 9

de l'effort centrifuge pour donner aux sections une forme convenable, en limitant considérablement les tâtonnements.

Supposons que l'on ait pour P_0 la hauteur d'eau h_0 , et qu'en P_1 on essaye un profil f_1 de caractéristique amont f_1 , où l'on veut la hau-

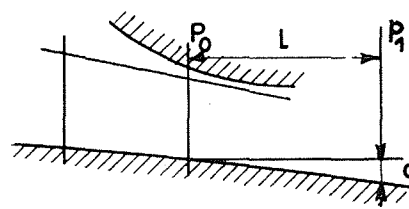


FIG. 10

teur d'eau h_1 ; on trace f_0 , puis la droite N_0U telle que $\text{tg } \alpha = Q^2$, on déplace f_1 parallèlement à OY de façon à avoir NO' , tel que $NO' + d = h_1$ correspond à l'écoulement désiré dans le tunnel; d correspond à la dénivellation des sections. Pour cela, on tracera f_1 en prenant O comme origine des hauteurs d'eau dans la section que l'on se propose d'employer en P_1 ; d est la distance suivant OY de f_1 à la droite NU pour $N'O' = h_1$.

N. RAYCHINE et P. CHATELAIN.