

Utilisation d'une méthode graphique simple pour l'étude de phénomènes transitoires dans des systèmes d'amenée d'eau

The use a graphical method for investigating transient phenomena in water supply systems

PAR G. COMBES

INGÉNIEUR A LA SOGREAH

Les grands aménagements urbains et hydro-agricoles nécessitent des installations d'adduction d'eau importantes et souvent complexes. La régulation des débits y est un problème délicat et exige une conception particulière de l'ensemble de l'installation et un certain nombre d'appareils de réglage automatique. L'étude de la stabilité de fonctionnement devient souvent difficile par les moyens habituels du calcul analytique. Il apparaît que l'exploitation de toutes les possibilités des méthodes graphiques permet de résoudre, dans ce domaine, des problèmes jugés parfois inextricables et, surtout, de faciliter l'appréciation du rôle joué par les différents paramètres.

Great urban and hydro-agricultural development schemes require large and often complex water supply installations. Discharge control is a delicate problem and necessitates whole installations of this kind being specially designed and a certain amount of automatic control equipment has to be used. It then often becomes very difficult to investigate operational stability by standard analytic methods. By making full use of the possibilities of graphical methods, it is seen that problems often considered to be too complicated can now be solved and, above all, it then becomes easy to appreciate the part played by the various factors.

Parmi les méthodes graphiques utilisées pour l'étude des mouvements non permanents dans les systèmes d'amenée d'eau, il en est une universellement connue : la méthode Bergeron.

Si elle a pu rendre de très grands services c'est, entre autres raisons, grâce à la simplicité de sa construction. Les utilisateurs de méthodes graphiques ne négligent jamais le moindre perfectionnement pratique capable de rendre l'exécution d'une épure plus rapide (1). C'est en effet de la rapidité d'exécution que dépend l'emploi plus ou moins grand d'une méthode et par suite son intérêt pratique pour l'hydraulicien.

Une autre méthode, fort intéressante, fut exposée dans cette même revue par MM. Bouvard

et Molbert (2). Elle s'appliquait aux installations hydroélectriques pourvues de cheminées d'équilibre. Son emploi était plus limité que celui de la méthode Bergeron mais, chaque fois qu'elle pouvait s'appliquer, elle présentait l'avantage de permettre la prise en compte d'une unité de temps plus grande et, de cette façon, d'augmenter la rapidité d'exécution dans de nombreux cas d'épures.

En réalité, elle eût pu présenter, dans de nombreux cas, une rapidité d'exécution plus grande encore si elle s'était inspirée plus étroitement, dans les détails de construction, de la méthode de Bergeron.

C'est en utilisant le principe de construction graphique de cette dernière et en faisant inter-

(1) Y. PONSAR, « Méthode pratique d'exécution des calculs graphiques », *la Houille Blanche*, n° 2, 1947.

(2) BOUVARD et MOLBERT, « Méthode graphique pour le calcul des cheminées d'équilibre », *la Houille Blanche*, n°s 5, 1950, et 2 et 3, 1951.

venir, chaque fois qu'il est nécessaire, la notion de hauteur accélératrice de la méthode de MM. Bouvard et Molbert, que l'on peut forger un outil d'application très générale et d'utilisation commode; nous allons montrer quelques exemples de son utilisation.

Ces exemples ont été choisis dans le domaine des grandes adductions d'eau. Cependant, la méthode s'applique aussi bien à l'étude des installations hydroélectriques et le lecteur pourra faire lui-même les rapprochements avec ses problèmes particuliers

L'ingénieur chargé de l'établissement de grands projets d'aménagements hydro-agricoles ou d'adduction d'eau potable se trouve souvent en présence de « troncs communs » en charge ou à surface libre destinés à véhiculer, de la prise d'eau jusqu'à la tête du réseau de distribution, des débits allant de quelques centaines de litres par seconde à quelques dizaines de mètres cubes par seconde.

Pour de nombreuses raisons, telles que économie d'eau, souplesse et sécurité d'exploitation, le projecteur est parfois amené à concevoir, pour ces canaux ou ces galeries, un fonctionnement automatique dans lequel le débit véhiculé est maintenu constamment sous la dépendance du débit réellement utilisé; on dit alors que l'on réalise une « commande par l'aval des débits ».

L'exemple le plus simple d'installation en « commande par l'aval » est donné par une conduite en pression reliant une retenue à un réservoir de distribution situé en tête d'un réseau.

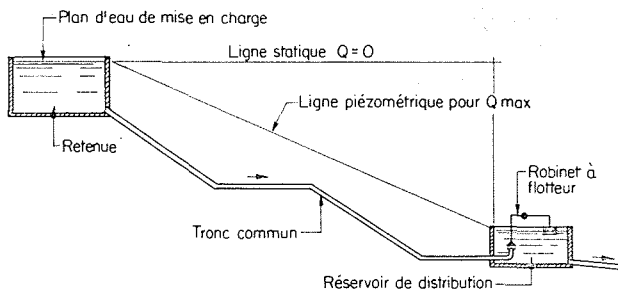


FIG. 1

L'extrémité aval de la conduite est obturée par un robinet à flotteur qui règle automatiquement le niveau dans le réservoir et asservit ainsi le fonctionnement de la conduite aux besoins des abonnés du réseau (fig. 1).

Au moment d'une diminution du débit, la ligne

piézométrique pivote autour du plan d'eau de mise en charge jusqu'à devenir horizontale. La pression à débit nul est donc plus élevée qu'à débit partiel et, pour cette raison, on est conduit parfois à diviser la conduite d'amenée en plusieurs tronçons limités par un brise-charge dans lequel une vanne automatique règle un plan d'eau qui sert de plan de mise en charge pour le tronçon suivant (fig. 2).

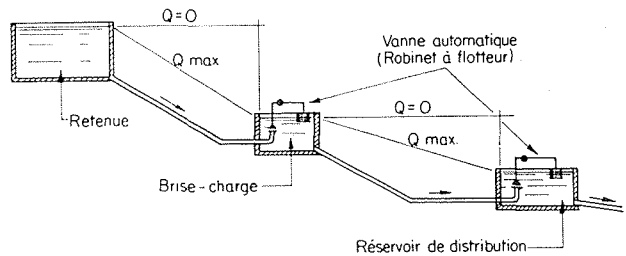


FIG. 2

Un autre exemple d'installation en « commande par l'aval » est celui des grands canaux d'irrigation dans lesquels on peut, grâce à un jeu de vannes automatiques séparant des biefs successifs, transmettre hydrauliquement les refus ou demandes de débit de l'aval vers l'amont (fig. 3).

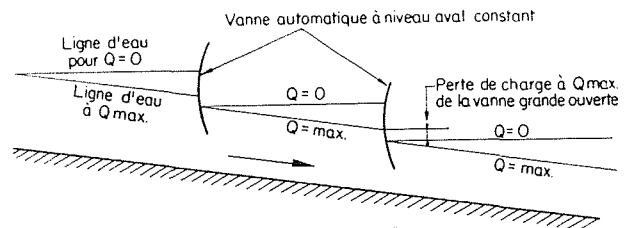


FIG. 3

Dans tous les projets relatifs à ce genre d'ouvrages, il est nécessaire de se pencher avec soin sur les conditions dans lesquelles la stabilité de fonctionnement peut être assurée.

Diverses méthodes sont à notre disposition pour cela : calcul analytique, constructions graphiques, modèles réduits.

Nous allons voir comment peut intervenir une méthode purement graphique dans l'analyse du fonctionnement d'un système d'adduction. Nous le ferons à l'aide de quelques exemples rencontrés dans l'établissement de projets de grands aménagements.

PREMIER EXEMPLE

Un tronc commun comprend une série de galeries en charge et de cuvettes à ciel ouvert qu'il

s'agit d'équiper de manière à ce que les débits transportés s'ajustent automatiquement aux de-

mandes de la consommation. Cette régulation des débits (commande par l'aval) nécessite l'implantation, au sortir des galeries, de vannes automatiques réglant un niveau sensiblement constant en tête du canal à ciel ouvert ou de la conduite en charge qui suit. Ces vannes évitent ainsi les débordements du canal au moment des refus de débit.

En certains points, où la longueur du canal entre deux éléments en charge successifs est négligeable, ces vannes sont encore nécessaires, car elles permettent de diminuer l'accroissement de pression sur la conduite aval lorsqu'on passe du débit maximum au débit nul.

C'est ainsi que le projeteur s'est trouvé devant le schéma hydraulique suivant :

- Un bassin à ciel ouvert, une galerie de pente voisine de 1 m/km et de diamètre moyen voisin de 4,00 m, une vanne automatique réglant un plan d'eau constant;
- Un bassin de faibles dimensions, une conduite en charge, etc.

Ces galeries, ou ces conduites, sont, pour le débit maximum de 30 m³/s, légèrement et uniformément en charge (2 m environ). A débit nul, la ligne de charge devenant horizontale, la pression varie de 2 m à l'extrémité amont, à 10 ou 15 m, suivant le cas, à l'extrémité aval (fig. 4).

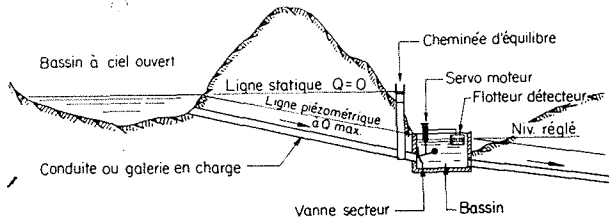


FIG. 4

Une des solutions possibles pour effectuer, dans ces conditions, le réglage du débit, consiste à placer, à la sortie de chaque galerie, une vanne-secteur manœuvrée par un servo-moteur électrique asservi au niveau dans le bassin.

Si, à la suite d'un appel de débit, le niveau a tendance à baisser dans le bassin, un flotteur détecteur agit sur le servo-moteur et la vanne s'ouvre; la position du flotteur doit être asservie à la position de la vanne. Ainsi, à chaque niveau dans le bassin correspond une position, et une seule, de la vanne.

Au cours de l'établissement du dossier d'avant-projet, une étude analytique fut menée pour déterminer la condition de stabilité d'un tel ensemble de tronçons fonctionnant en régulation par l'aval des débits.

Mais, à moins de faire intervenir des procédés de calcul complexes, cette étude ne pouvait être

menée que pour des oscillations de faible amplitude autour d'une position d'équilibre.

Or, il était intéressant de connaître l'amplitude et le coefficient d'amortissement des oscillations que produirait un appel ou un refus de débit d'importance donnée.

C'est ainsi que l'on pensa à une méthode graphique.

On connaît diverses méthodes graphiques d'analyse des mouvements en masse. Nous avons déjà cité celle qui fut exposée dans la revue *la Houille Blanche* par MM. Bouvard et Molbert (1). Pour analyser les variations du plan d'eau dans une cheminée d'équilibre, les auteurs font intervenir la notion de « hauteur accélératrice », d'expression :

$$H_a = \frac{Lf}{g} \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

et la notion de continuité :

$$\Delta t (q_c - q_s) = S \cdot \Delta h$$

avec :

L = longueur de la galerie,

f = section de cette galerie,

q_c = débit en provenance de la galerie,

q_s = débit demandé à l'aval,

S = section de la cheminée.

Δh = variation du niveau dans la cheminée pendant l'intervalle de temps Δt .

Nous avons conservé le principe de base de cette méthode mais en modifiant, pour augmenter la rapidité d'exécution, certains détails de son application de manière à ce qu'elle ressemble, dans son mode de construction, à celle de Bergeron que nous avons l'habitude d'employer.

Un auteur anglais, M. Blackmore, a d'ailleurs exposé, dans la revue *Water Power* de 1952, une méthode exactement semblable et nous emploierions ses expressions pour la résumer brièvement :

Continuité

Appelons :

$(q_e)_t$ le débit entrant dans un bassin (ou une cheminée) à un instant t ,

$(q_e)_{t+\Delta t}$ le débit entrant dans un bassin (ou une cheminée) à un instant $t+\Delta t$,

$(q_s)^{t+(\Delta t/2)}$ le débit sortant du bassin (ou de la cheminée) à l'instant $t+(\Delta t/2)$.

La montée de niveau dans le bassin pendant

(1) *La Houille Blanche*, n° 5/1950, 2 et 3/1951.

l'intervalle Δt sera obtenue en faisant entre les abscisses de q_e et de q_s un zig-zag appelé « ligne z » dont les droites ont une pente $(1/2) \cdot (\Delta t/s)$; s étant la surface du bassin.

On relie ainsi automatiquement la variation de niveau à la valeur *moyenne* des débits pendant chaque intervalle de temps.

Inertie

La variation de vitesse dans une conduite, dans un intervalle de temps donné, est inversement proportionnelle à la masse d'eau en mouvement et proportionnelle à une force représentée par la différence entre l'état de pression (hauteur dans la cheminée, par exemple) au moment considéré et l'état de pression qui régnerait en régime normal pour la même vitesse moyenne pendant cet intervalle.

Appelons :

$(h_c)_t$ la cote du plan d'eau dans la cheminée à l'instant t ;

$(h_c)_{t+\Delta t}$ la cote du plan d'eau dans la cheminée à l'instant $t+\Delta t$;

$(h_c)_{t+(\Delta t/2)}$ la cote du plan d'eau qu'il y aurait dans cette cheminée en régime permanent normal, pour un débit dans la conduite égal à :

$$(q_e)_{t+(\Delta t/2)}$$

La variation élémentaire du débit dans la galerie pendant l'intervalle de temps Δt est obtenue

grâce à un zig-zag appelé « ligne W » entre les cotes du plan d'eau dans la cheminée aux instants t et $t+\Delta t$, le « point de réflexion » étant l'ordonnée $(h_c)_{t+(\Delta t/2)}$

La pente des demi-droites W est : $\pm \frac{2L}{gf\Delta t}$

La construction d'une épure de fermeture dans le cas d'une installation simple : galerie et cheminée à caractéristique unique, s'effectue donc comme indiqué sur la figure 5.

A partir des éléments de cette épure, nous avons choisi de procéder à une construction où l'on travaillerait simultanément sur deux diagrammes :

- un diagramme $N(Q)$ (N : niveau dans la cheminée),
- un diagramme $n(Q)$ (n : niveau dans le bassin de restitution de la vanne).

Sur le premier sera portée la parabole représentative des pertes de charge dans la galerie.

Sur le second seront portées les droites représentatives de la loi de la vanne automatique et de son régulateur : pour un niveau donné dans la cheminée et en régime permanent, le niveau du bassin est par construction lié linéairement à l'ouverture de la vanne et par suite au débit passant sous celle-ci (dans l'hypothèse où la contraction de la veine liquide sous la vanne varie peu avec l'ouverture de celle-ci).

On tracera un faisceau de droites $n(Q)$ numérotées en niveau cheminée.

Remarquons que dans le cas étudié, et en raison du calage des différents éléments, les variations de niveau dans le bassin de restitution de la vanne sont faibles devant la perte de charge de la vanne et sans influence sur son débit. D'autre part, la vitesse de manœuvre de la vanne (fonction du type de servo-moteur utilisé) est supposée toujours suffisante pour que celle-ci puisse suivre sans retard les variations les plus rapides du niveau dans le bassin.

La construction ainsi établie n'est valable que si, à chaque position du plan d'eau dans le bassin, correspond une seule position bien déterminée de la vanne; c'est-à-dire, si la vitesse de montée ou de descente de ce plan d'eau est toujours plus faible que la vitesse à laquelle le servo-mécanisme peut, à lui seul, le faire bouger par son action sur la vanne.

Enfin, la marge d'insensibilité du régulateur est négligeable vis-à-vis des amplitudes étudiées et il n'en est pas tenu compte.

Il est alors possible de mener deux épures de front.

La figure 6 montre une construction réalisée pour étudier l'amortissement d'une impulsion initiale constituée par une variation de $1 \text{ m}^3/\text{s}$

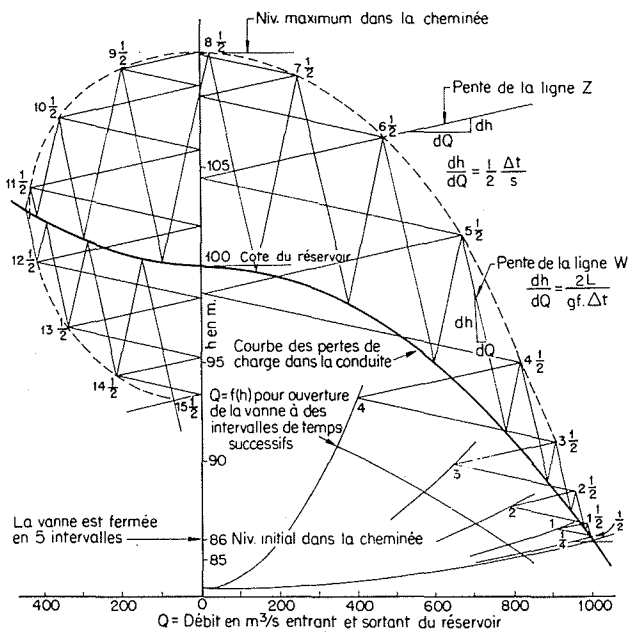


FIG. 5

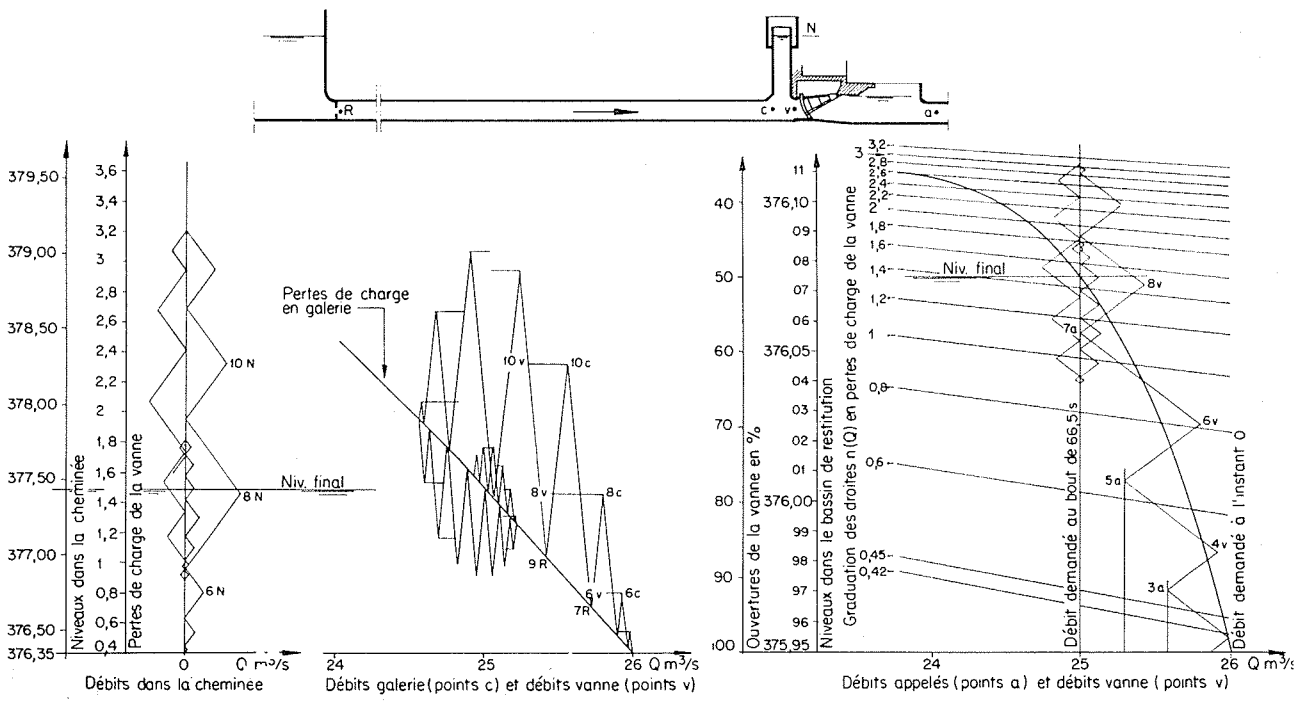


FIG. 6

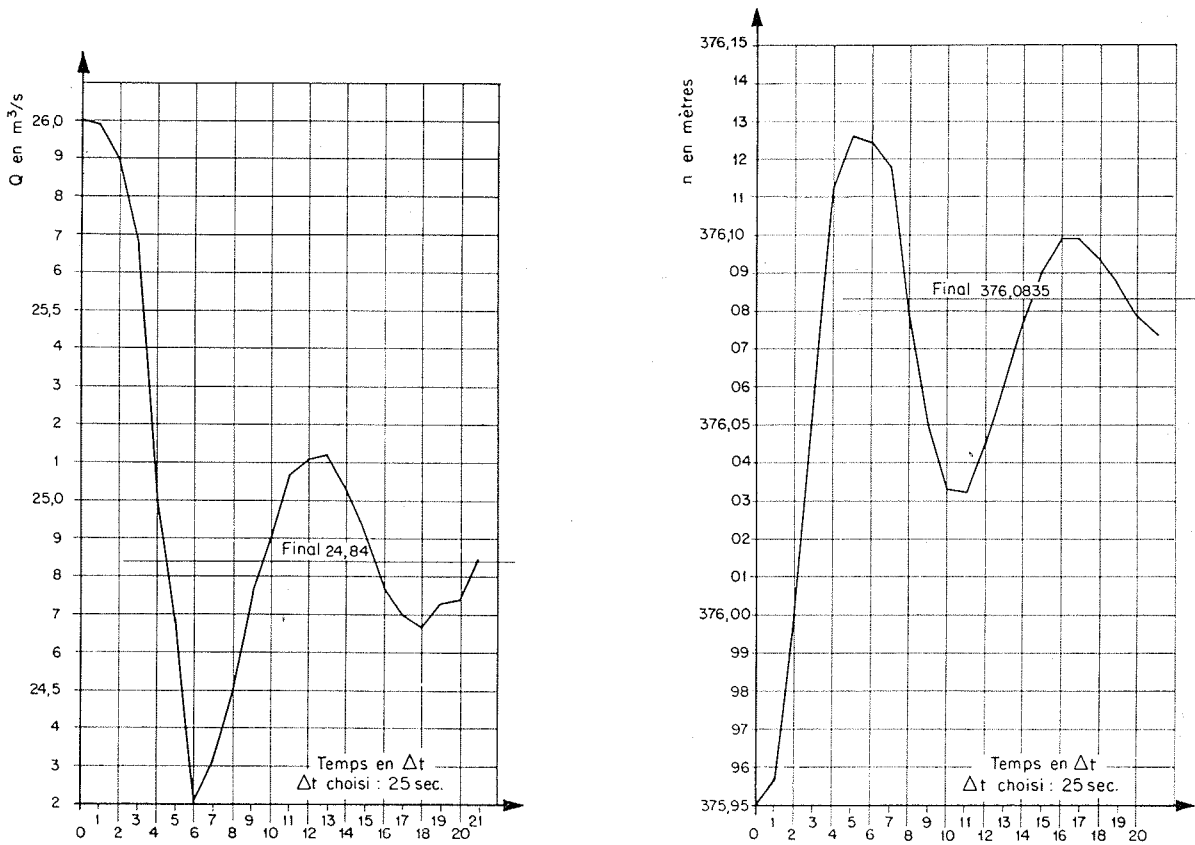


FIG. 7

du débit appelé par la conduite aval (variation de 26 à 25 m³/s en 70 secondes).

Pour plus de clarté, sur cette figure, nous avons dissocié le diagramme des droites Z de la cheminée (à l'extrême-gauche) du diagramme des droites W (au centre). Pour la compréhension de l'épure, il suffit de remarquer, par exemple, que le segment de droite 10_v — 10_c est égal à l'abscisse du point 10 N.

DEUXIÈME EXEMPLE

Il était intéressant de savoir si une telle méthode d'investigation pouvait s'appliquer aux différents types d'organes de régulation habituellement utilisés en irrigation ou en adduction d'eau.

Dans l'exemple qui précède, la vanne automatique étudiée possédait les caractéristiques suivantes :

- Elle était insensible à la charge amont;
- Elle possédait une loi bien déterminée liant le niveau aval à l'ouverture;
- Son inertie propre et les caractéristiques de son servo-moteur étaient telles que dans sa manœuvre elle pouvait exécuter sans retard tous les ordres donnés par le niveau.

Un autre type de vanne possède des caractéristiques sensiblement analogues : il s'agit de la vanne cylindrique (1) dont la figure 8 permet de comprendre le fonctionnement :

L'extrémité aval de la canalisation d'aménée est équipée d'un seuil profilé; au-dessus de ce seuil, une chemise cylindrique obturatrice est

La figure 7 montre les résultats que l'on obtient en dépouillant des épures de ce genre.

L'amplitude des oscillations et leur amortissement sont parfaitement déterminés.

Des renseignements importants, tels que vitesse de manœuvre de la vanne, degré d'ouverture, vitesse de montée dans la cheminée, peuvent en être également tirés.

suspendue à un fléau de balance. Cette chemise est arasée à une cote supérieure à celle du plan d'eau amont. Sa levée est asservie, par l'intermédiaire du fléau et d'un flotteur, au niveau aval.

Ce genre d'appareil peut remplacer avantageusement les vannes-secteur à servo-moteur asservi au niveau aval chaque fois que la charge

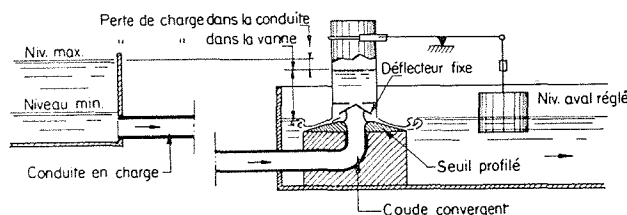


FIG. 8

amont (à débit nul) reste dans des limites acceptables (de l'ordre de 10 m par exemple); c'est en effet cette charge qui impose les dimensions verticales de la cheminée cylindrique et, par suite, l'importance de la vanne.

Une épure de stabilité de fonctionnement d'une vanne cylindrique, placée en bout de conduite et réglant un niveau dans un bassin, se conduira donc comme l'épure de la figure 6.

TROISIÈME EXEMPLE

Par contre, une légère complication apparaît lorsque l'on veut étudier la stabilité d'une installation comportant un organe sensible à la pression qui règne dans la conduite.

Il est arrivé, par exemple, que l'on veuille étu-

dier le fonctionnement d'un « obturateur à disque » (1), sorte de robinet-vanne automatique à flotteur dont l'obturateur (à centrage hydraulique sur sa buse) est sensible à la pression amont. Dans un tel type d'appareil, l'effort hydraulique

(1) Appareil breveté par les Etablissements Neyrpic.

(1) Appareil breveté par les Etablissements Neyrpic.

auquel le disque est soumis ne dépend, pour des caractéristiques déterminées de la buse et du disque, que de la pression dans la conduite et non du degré d'ouverture (pour autant que cette ouverture reste inférieure à une certaine limite). La manœuvre de l'obturateur est commandée par l'intermédiaire d'un fléau et d'un flotteur plongeant dans le niveau à régler. L'appareil est placé au débouché d'une conduite dans un bassin dont il règle le plan d'eau.

Dans ces conditions, voyons comment peut être construite l'épure représentative des conséquences d'un appel ou d'un refus de débit dans un bassin disposé comme l'indique la figure 9.

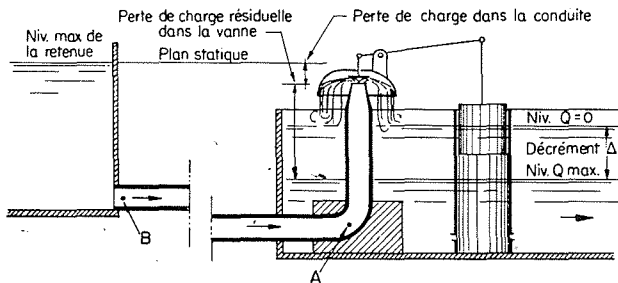


FIG. 9

Supposons, cette fois, qu'il n'y ait pas de cheminée d'équilibre et que l'élasticité de l'eau et de la conduite ne puisse être négligée; on utilisera pour lignes W les « droites Bergeron » de pente $\pm(a/g_s)$ (a : célérité des ondes de pression dans la conduite; s : section de la conduite).

Le diagramme de gauche de la figure 6 disparaîtra. Le diagramme central gardera la même allure : il sera simplement gradué (en ordonnées) en pression à l'amont de l'obturateur et sera constitué par une épure Bergeron classique.

Un changement important apparaîtra dans le diagramme de droite (niveaux bassin en fonc-

tion du débit) qui aura l'allure indiquée sur la figure 11.

Les figures 10 et 11 montrent le principe de construction d'un point de l'épure.

Le passage du point t au point $t+\Delta t$ s'effectue de la manière suivante :

On sait que le point caractéristique de l'état en A à l'instant $t+\Delta t$ dans le diagramme pression-débit se trouve sur une droite Bergeron is-

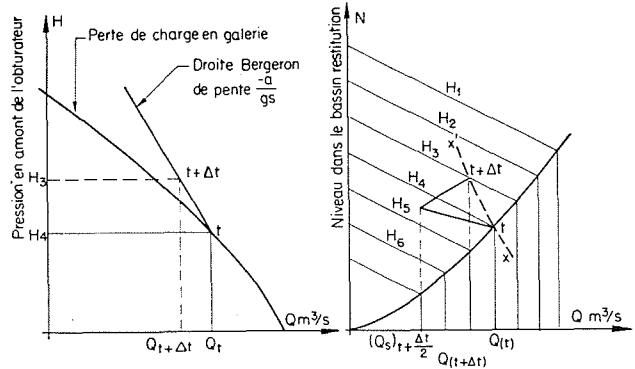


FIG. 10

FIG. 11

sue du point caractéristique de l'état en B à l'instant t .

On peut tracer facilement un élément xx' de la transformée de cette droite Bergeron dans le diagramme $N(Q)$ (niveau-débit).

On connaît, d'autre part, le débit sortant du bassin à l'instant $t+(\Delta t/2)$:

$$(Q_s)_{t+(\Delta t/2)}$$

Un zig-zag effectué à l'aide des droites de pente $(1/2) \cdot (\Delta t/S)$ (où S est la surface du bassin) entre les ordonnées du débit entrant dans le bassin par l'obturateur et du débit sortant donne, à l'intersection avec xx' , le point cherché : débit de l'obturateur à l'instant $t+\Delta t$.

QUATRIÈME EXEMPLE

Dans certaines installations, il n'est pas possible, sans grands frais, de disposer au voisinage de la vanne d'une source d'énergie : courant électrique par exemple. Un servo-moteur du type décrit dans le premier exemple traité ne peut être utilisé. D'autre part, si la charge est importante, on ne peut songer à l'emploi d'une vanne cylindrique.

On peut alors avoir recours à un dispositif entièrement hydraulique : obturateur à disque comme ci-dessus (ou vanne-secteur) suspendu

par une tringlerie appropriée à un flotteur plongeant dans le niveau à régler. Malheureusement, ces systèmes présentent un « décrément » de niveau important : nous voulons dire qu'ils ne règlent le niveau qu'à quelques dizaines de centimètres près, alors qu'on peut avoir besoin d'un réglage beaucoup plus fin.

On leur adjoint alors parfois le dispositif « à danaïde », sorte de relais hydraulique dont le schéma (fig. 12) permet de comprendre le fonctionnement : un petit débit de fuite traverse

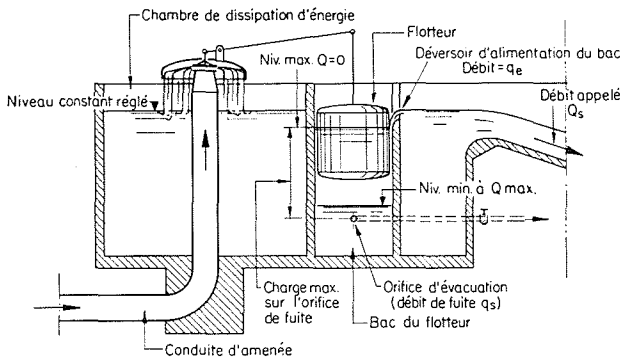


FIG. 12

le bac du flotteur; le circuit auxiliaire ainsi formé est constitué au départ par un petit déversoir calé à quelques millimètres au-dessous du niveau à régler, et à la sortie par un diaphragme réglable relié à l'égout.

Si le niveau dans le bassin tend à monter, le débit auxiliaire déversé dans le bac croît et la charge nécessaire pour l'évacuer par le diaphragme augmente. On arrive ainsi à faire correspondre à une variation très faible de niveau dans le bassin, une variation beaucoup plus importante de niveau dans le bac.

Supposons que nous ayons à étudier le fonctionnement d'une installation comportant une conduite en charge alimentée à son extrémité amont par un réservoir et terminée à son extrémité aval par un obturateur à disque (donc sensible à la pression) équipé d'un système à danaïde.

L'épure exigera la mise en place des diagrammes indiqués sur la figure 13.

Nous y retrouvons d'abord un diagramme analogue à celui de la figure 10 et représentant les caractéristiques débit, pression amont et ouverture de l'obturateur en fonction des niveaux dans le bac du flotteur (et non plus du bassin aval comme dans le cas de l'obturateur direct).

A côté de ce diagramme se trouve la courbe caractéristique de l'orifice de fuite du bac : débit de fuite (q_s) en fonction de la hauteur d'eau dans le bac.

En dessous, nous placerons le diagramme « niveaux bassins-débit » à côté duquel sera représentée la courbe caractéristique du déversoir d'alimentation du bac : débit auxiliaire (q_e) en fonction de la hauteur d'eau dans le bassin.

Enfin, nous disposerons le diagramme $H(Q)$ (pression-débit) de l'épure « Bergeron » du coup de bélier dans la conduite.

Sa construction pourra s'effectuer de la façon suivante : soit un état caractéristique, à l'instant t bien connu.

On connaît le débit Q_s qui sortira du bassin à l'instant $t+(\Delta t/2)$ (c'est une donnée du problème puisque, en général, c'est la variation de

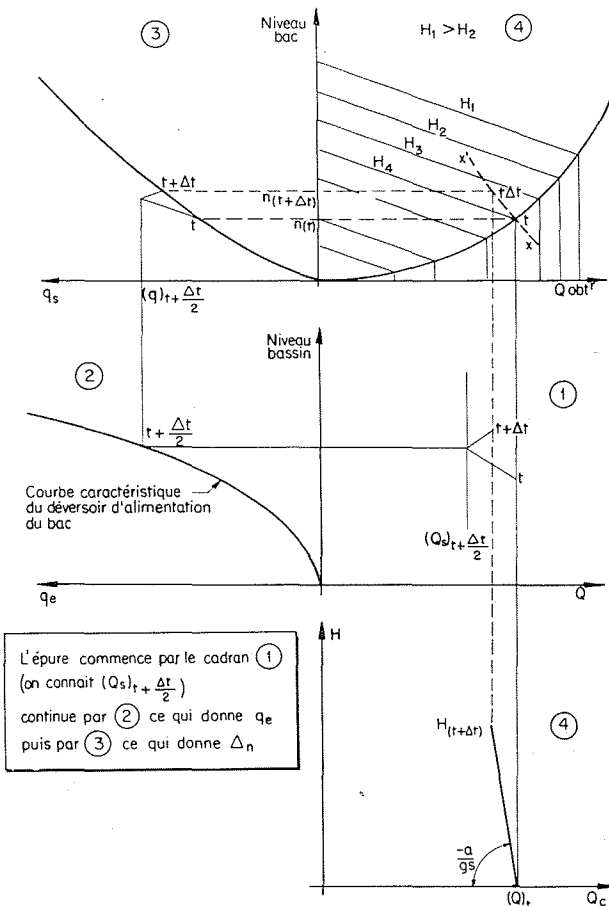
ce débit qui crée l'impulsion et met l'ensemble du système en mouvement).

On en déduit q_e à l'instant $t+(\Delta t/2)$; un zigzag effectué entre q_s et q_e avec des droites Z de pente $(1/2) \cdot (\Delta t/\Sigma)$ (Σ : surface du bac) permet d'obtenir le niveau n dans le bac, à l'instant $t+\Delta t$.

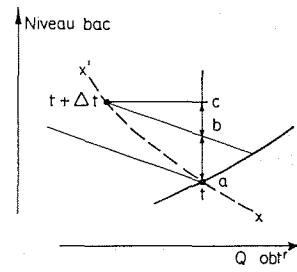
On a pu, d'autre part, construire dans le diagramme $n(Q)$ la transformée ax' de la droite Bergeron de pente $-(a/gS)$. L'ordonnée $n(t+\Delta t)$ coupe ax' en un point qui donnera les caractéristiques débit et charge de l'obturateur à l'instant $t+\Delta t$.

Remarque

Nous avons vu que la montée de niveau Δn



L'épure commence par le cadran (1) (on connaît $(Q_s)_{t+\frac{\Delta t}{2}}$) continue par (2) ce qui donne q_e puis par (3) ce qui donne Δn



ac représente Δn la variation totale du niveau
 ab représente Δe , variation de niveau due à l'enjaugeage du flotteur.
 bc représente Δc , variation de niveau due à la course du flotteur

FIG. 13

dans le bac pouvait s'obtenir à partir d'un zigzag effectué entre q_e et q_s à l'aide de droites de pente $(1/2) \cdot (\Delta t / \Sigma)$. On traduit ainsi graphiquement la relation :

$$(q_e - q_s) t = \Sigma \cdot \Delta n$$

Σ : section totale du bac

Or, cette relation ne tient pas compte de tous les éléments du problème. En effet, pendant l'intervalle de temps Δt , la pression dans la conduite passe de H_t à $H_{t+\Delta t}$ (avec par exemple $H_{t+\Delta t} > H_t$); le flotteur s'enjauge donc d'une certaine quantité Δe à laquelle correspond un déplacement d'eau :

$$\sigma \cdot \Delta e \quad (\sigma : \text{surface du flotteur})$$

On a donc en fait :

$$(q_e - q_s) \Delta t = \Sigma \cdot \Delta n - \sigma \cdot \Delta e$$

L'exemple de construction de la figure 13 suppose que $\sigma \cdot \Delta e$ est petit devant $\Sigma \cdot \Delta n$. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, on fait intervenir une correction à la construction au passage du cadran 3 au cadran 4, de manière à obtenir le Δn réel, c'est-à-dire :

$$\Delta n = (q_e - q_s) (\Delta t / \Sigma) + (\sigma / \Sigma) \cdot \Delta e$$

Cette correction est facilitée par la lecture sur le graphique de la valeur Δe de la différence d'enjaugeage du flotteur (voir fig. 13).

CINQUIÈME EXEMPLE

Si l'installation précédente avait comporté, à la place de l'obturateur à disque, une vanne cylindrique ou secteur insensible à la pression dans la conduite, la construction eût été un peu plus simple.

En effet, les caractéristiques $n_{\text{bac}} = f(Q_{\text{obt}})$ se

seraient réduites à une seule caractéristique (H n'intervenant plus comme paramètre).

Il n'y aurait pas eu besoin de construire la transformée xx' : l'intersection de l'ordonnée $n_{t+\Delta t}$ avec la caractéristique $n(Q)$ eût donné directement l'abscisse du point $H_{t+\Delta t}$.

SIXIÈME EXEMPLE

On veut placer, à l'aval d'une galerie en charge et au débouché de cette galerie dans un bassin, un système permettant à l'installation de fonctionner en commande par l'aval des débits. Il s'agit de concevoir un système réglant automatiquement le plan d'eau dans le bassin avec une précision suffisante et sans apport d'énergie extérieure (absence de ligne électrique dans le voisinage).

On place, à la sortie de la galerie, une vanne-secteur capable de laisser passer, à pleine ouverture, 35 m³/s sous 0,80 m de charge (voir fig. 14). La manœuvre de cette vanne doit être commandée par le niveau du bassin, de façon à ce qu'une montée de quelques centimètres du niveau de ce dernier provoque une fermeture partielle de la vanne.

Un contre-poids équilibre le poids propre de la vanne et plonge dans l'eau d'un bac indépen-

dant du bassin dans lequel s'écoule le débit principal. Un débit auxiliaire, prélevé sur la galerie grâce à une tuyauterie, est amené au bac d'où il s'échappe par l'intermédiaire d'une vanne cylindrique identique à celle figurée sur la figure 8. Le flotteur de cette vanne cylindrique plonge dans le niveau du bassin: il provoque la fermeture lorsque ce niveau monte et son ouverture dans le cas contraire.

En simplifiant, on a donc le processus suivant: une montée de niveau dans le bassin (due à une diminution de la consommation d'eau en aval) provoque une fermeture de la vanne cylindrique. Cette fermeture provoque une montée de niveau dans le bac: le contrepoids de la vanne-secteur reçoit une poussée vers le haut et la vanne-secteur se ferme à son tour.

En somme, l'ensemble bac-contre-poids est assimilable à un moteur de manœuvre, alors que

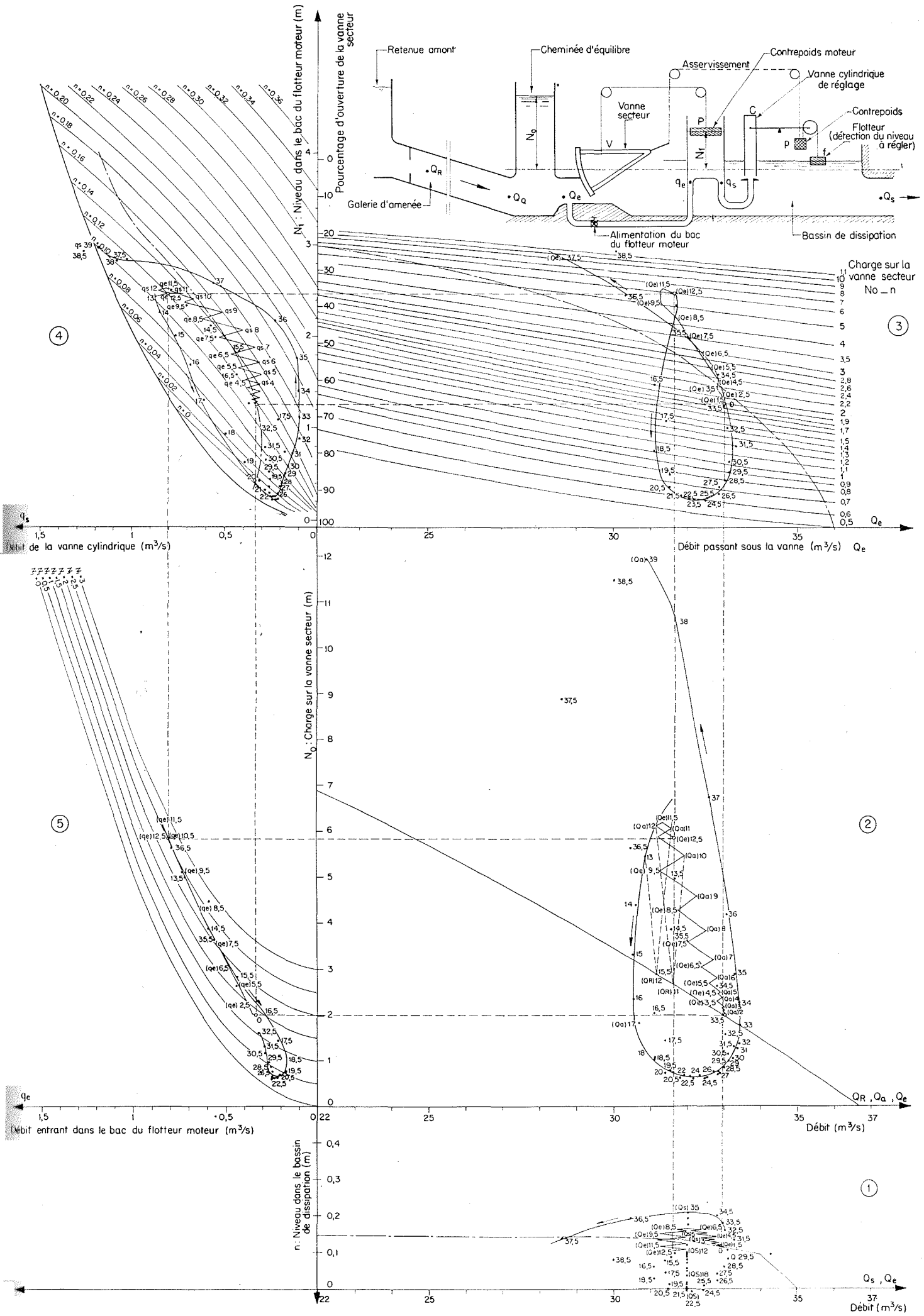


Fig. 14

la vanne cylindrique constitue un servo-mécanisme et son flotteur, un détecteur de la quantité à régler, en l'occurrence le niveau.

Un dispositif d'asservissement de la position de la vanne cylindrique (organe de commande) au degré d'ouverture de la vanne-secteur (organe commandé) est nécessaire.

Il est réalisé simplement de la manière suivante : le fléau de la vanne cylindrique ne supporte pas directement le flotteur mais une poulie sur laquelle passe un câble. Une extrémité de ce câble est liée au flotteur plongeant dans le bassin. L'autre extrémité est fixée à la vanne-secteur.

Grâce à ce dispositif, à chaque niveau du bassin correspond, en régime permanent, une position, et une seule, de la vanne-secteur.

La complexité d'une telle installation rend difficile la détermination des conditions pour lesquelles son fonctionnement présentera toutes les garanties de stabilité.

On peut cependant, grâce à une méthode graphique du même type que celle examinée au quatrième exemple, suivre l'évolution dans le temps des niveaux dans le bassin, le bac et la cheminée d'équilibre, à la suite d'une perturbation en provenance, par exemple, de l'aval.

L'épure constitue alors une sorte de modèle mathématique de l'installation.

Les courbes de base permettant la construction de cette épure sont placées dans cinq quadrants :

PREMIER QUADRANT : Niveau dans le bassin en fonction du débit. L'axe des abscisses porte la même graduation que les deuxième et troisième quadrants. La courbe en trait mixte représente, pour le régime permanent, la loi théorique du débit entrant dans le bassin en fonction du niveau dans ce dernier.

DEUXIÈME QUADRANT : Charge en amont de la vanne-secteur (ou niveau dans la cheminée) en fonction du débit. On introduit ici la loi des pertes de charge dans la galerie d'aménée en fonction du débit qui parcourt cette galerie.

TROISIÈME QUADRANT : Pourcentage d'ouverture de la vanne-secteur en fonction du débit. L'axe des ordonnées est gradué à la fois en ouverture de la vanne et en niveau dans le bac. La position de la vanne est en effet liée, par l'intermédiaire du contrepoids, au niveau de ce dernier. On peut tracer un réseau de courbes graduées en valeurs de la charge sur la vanne-secteur.

QUATRIÈME QUADRANT : Niveau dans le bac (ou encore charge sur la vanne cylindrique) en fonction du débit auxiliaire traversant la vanne cylindrique. On peut tracer un réseau de courbes graduées en valeurs du niveau dans le bassin. À toute valeur du niveau dans le bac correspond une position de la vanne-secteur et, par suite, de la poulie du fléau de la vanne cylindrique. Pour chaque valeur de ce niveau on peut donc connaître la valeur de l'ouverture de la vanne cylindrique et par conséquent le débit auxiliaire q_s de cette vanne.

CINQUIÈME QUADRANT : Débit de la conduite alimentant le bac du contrepoids en fonction de la charge amont (c'est-à-dire du niveau dans la cheminée et du niveau dans le bac).

Nous n'entrerons pas dans le détail de la construction de l'épure; cette construction est très semblable à celles qui ont déjà été décrites.

Dans le premier quadrant, on observe des montées élémentaires de niveau en fonction de la différence (pendant chaque intervalle de temps) entre le débit sortant du bassin Q_s et le débit Q_e entrant dans ce bassin par l'intermédiaire de la vanne-secteur.

Dans le deuxième quadrant, on obtient la montée du niveau dans la cheminée d'équilibre, compte tenu de la différence entre les débits dans la galerie et sous la vanne-secteur, et aussi de l'inertie de la masse d'eau en mouvement dans la galerie.

Dans le troisième quadrant, on trouve la valeur de l'ouverture de la vanne-secteur et par suite la position du niveau dans le bac du contrepoids en fonction du débit et de la charge sur la vanne.

Le quatrième quadrant permet de connaître les montées élémentaires de niveau dans le bac du contrepoids en fonction de la différence entre les débits entrant et sortant de ce dernier.

Le cinquième quadrant permet de vérifier si le débit entrant dans le bac et déjà trouvé, vérifie bien la loi de débit de la tuyauterie d'alimentation de ce dernier.

Dans l'exemple traité sur la figure, on note une nette instabilité du fonctionnement; une petite perturbation dégenère en grande oscillation de l'ensemble du système.

En résumé, le canevas constitué par les cinq quadrants de cette épure représente une sorte de modèle sur lequel on peut faire les manœuvres que l'on désire et étudier leur évolution.

SEPTIÈME EXEMPLE

Tous les exemples qui précèdent avaient un caractère commun : il s'agissait d'organes de réglage sur canalisations en charge.

Lorsqu'il s'agit d'étudier la stabilité de fonctionnement d'une vanne automatique placée entre deux biefs successifs d'un canal à ciel ouvert, l'intervention de la méthode graphique d'investigation paraît plus difficile. En effet, alors que les mouvements transitoires faisant intervenir l'inertie des masses d'eau en mouvement dans les systèmes en charge peuvent être traités par des méthodes relativement simples d'application (Schoklischt ou Bergeron), les mouvements transitoires dans les canaux à surface libre exigent du projeteur l'application de méthodes graphiques telles que celle exposée par M. A. Craya dans *la Houille Blanche* de novembre 1945. Or, cette dernière méthode est relativement plus complexe et son emploi deviendrait lourd si on voulait faire intervenir les caractéristiques hydrauliques des vannes automatiques placées dans les canaux.

Heureusement, dans un assez grand nombre de cas, il est possible d'appliquer, aux mouvements transitoires dans les canaux, la méthode graphique Bergeron. M. Bergeron a traité un exemple dans son livre *Du coup de bélier au coup de foudre* et nous ne reviendrons pas sur le principe de la construction. L'emploi de cette méthode se justifie chaque fois que les vitesses de l'eau sont faibles par rapport aux vitesses de propagation d'ondes.

Supposons que l'on ait à étudier une installation comprenant une vanne-secteur placée en haut d'un coursier et asservie par l'intermédiaire d'un câble et d'un flotteur au niveau qui règne dans le canal à écoulement fluvial faisant suite au coursier (fig. 15).

Si un refus de débit se fait sentir en aval du canal, une courbe de remous apparaît et le niveau monte à l'aplomb du flotteur; ce dernier commande alors la fermeture de la vanne.

La stabilité de fonctionnement d'un tel système est douteuse *a priori*.

En effet, tout changement de niveau dans le canal au point A ne produit pas instantanément un changement de débit en ce point. Il y a un retard dû à la propagation de l'onde de débit le long du coursier.

Le niveau en A va donc, au cours d'un refus de débit, dépasser la valeur à laquelle il aurait

dû être maintenu et faire ainsi fermer un peu trop la vanne-secteur.

Mais on peut s'assurer d'un bon ou mauvais fonctionnement du système à l'aide d'une épure Bergeron et de la loi niveau-débit de la vanne

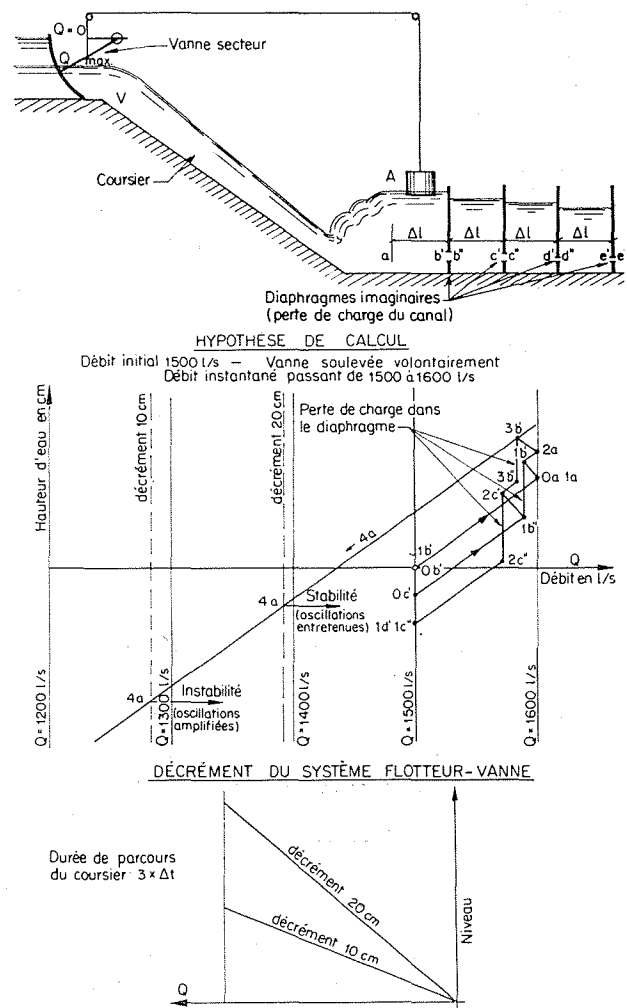


FIG. 15

(à tout niveau en A correspond une ouverture de la vanne, donc un débit en V).

On s'aperçoit ainsi que le système n'est stable que pour ces « décrets » suffisants de la vanne, c'est-à-dire si on peut tolérer une différence de cote suffisante entre le niveau correspondant à un état de fermeture de la vanne

et le niveau correspondant à l'état de pleine ouverture.

L'épure se mène sans difficulté et, en quel-

ques heures, un agent technique qualifié peut en avoir fait plusieurs et apprécié les conditions de stabilité à tous régimes du système étudié.

CONCLUSION

On vient de voir qu'il est possible, par des constructions graphiques simples, d'analyser le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs de régulation utilisés en irrigation ou en adduction d'eau potable.

Cela ne signifie pas que cette méthode permette à elle seule de résoudre tous les problèmes et particulièrement tous ceux relatifs à la stabilité de fonctionnement de ces divers systèmes.

Elle a cependant l'avantage :

- D'être rapide dans son application, car elle ne met en jeu que des constructions très simples;

- De permettre au projeteur de suivre l'évolution des phénomènes physiques et d'apprécier ainsi plus facilement l'influence des diverses caractéristiques de l'installation étudiée.

L'expérience a prouvé que, dans de nombreux cas, elle permettait d'obtenir rapidement une idée claire et précise du fonctionnement d'un système et par là, de projeter plus facilement des modifications améliorant ce fonctionnement.

Enfin, elle devrait être appréciée de l'ingénieur d'études car, grâce à sa simplicité, ce dernier peut se décharger de la construction de l'épure sur des agents qualifiés.

EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN

(Colombia S.A.)

lance un appel d'offres pour la construction du barrage Troneras sur la rivière Guadalupe.

Les caractéristiques sont les suivantes :

- Barrage en terre compactée d'un volume de 750 000 mètres cubes;
- Excavations de l'ordre de 1 million de m³;
- Longueur de crête : 400 m;
- Hauteur maximum : 35 m;
- Galerie de dérivation de 460 mètres de longueur pour un diamètre de 4 m.

Les entreprises intéressées sont priées de s'adresser à :

APARTADO AÉREO 940, MEDELLIN, COLOMBIA, S.A.

pour tous renseignements.

Les offres ne seront acceptées que des sociétés observant les règlements en vigueur et qui se seront inscrites avant le 22 juin 1959.