QUELQUES RÉFLEXIONS SUR L'ÉVOLUTION DES SYSTÈMES DE RÉGULATION DE DÉBITS ET DE NIVEAUX DANS LES CANAUX

PAR G. COMBES *

L'ingénieur, chargé d'établir un projet d'irrigation ou d'adduction d'eau comprenant de grands canaux, cherche à équiper ces derniers de manière à ce que l'adaptation de leur fonctionnement aux fluctuations des besoins et des ressources s'effectue dans le minimum de temps, avec le minimum de risques de débordements ou de déficits, et cela sans entraîner des aménagements coûteux.

Certains systèmes de régulation de débit ayant fait récemment l'objet d'études nouvelles, nous avons essayé de comparer les divers systèmes connus et en cours d'essais afin de dégager les tendances actuelles dans ce domaine.

1. L'asservissement du fonctionnement d'un canal aux besoins des utilisateurs

Ce fut le but de nombreuses recherches et en particulier de celles qui aboutirent, entre 1945 et 1950 à la définition et à la mise au point de la « Commande par l'aval » au moyen de régulateurs divisant le canal en plusieurs biefs.

Ces régulateurs peuvent être divisés en deux catégories :

- ceux qui utilisent l'eau pour la transmission des informations (ondes);

- ceux qui utilisent des câbles téléphoniques ou l'électronique pour cette transmission.

a) La commande par l'aval classique (fig. 1).

Sur un bief AB de longueur L, on peut envisager :

- soit le système 1 où l'effet de débit se transmet par une dépression, onde négative, vers le régulateur A, celui-ci étant équipé pour maintenir constant le niveau à son aval;
- soit le système 2, où l'appel de débit est transmis électriquement au régulateur A qui ouvre et envoie une onde positive vers l'aval.

Dans le cas 1, l'appel peut commencer à obtenir satisfaction dès son apparition grâce à la réserve

* SOGREAH, Grenoble.

constituée par l'onglet $aa'b$. Cependant, le régulateur amont ne commence à ouvrir que :

$$t = L/a$$

(L : longueur du bief; a : célérité des ondes) après le début de l'appel en B. L'obtention du régime définitif dans le bief exige un temps égal à plusieurs L/a .

Dans le cas 2, l'appel de débit ne peut commencer à obtenir satisfaction qu'après un temps L/a , bien que la vanne A commence à ouvrir à l'instant 0, et cela parce qu'il n'y a pas de réserves au-dessus de la ligne d'eau de débit maximal.

On voit donc que, pour obtenir une réponse instantanée aux variations de la demande, il est nécessaire, même si on emploie des télétransmissions, de ménager dans le canal une certaine réserve que nous appellerons « réserve de fonctionnement ».

Même si l'électronique vient à l'aide de l'hydraulique pour diminuer les temps de transmission des informations, il faut compter un temps toujours important pour que s'effectue le changement de régime hydraulique d'un canal; d'où des problèmes de stabilité pour le système de régulation. Il faut par exemple passer d'une ligne horizontale à débit nul à une ligne de pente à débit maximal et ce basculement est lent surtout si le bief est long. Les conduites en charge, elles, sont plus souples à ce point de vue : le basculement de la ligne piézométrique est en général plus rapide.

On peut imaginer plusieurs façons de faire pivoter la ligne d'eau selon que l'horizontale de débit nul est placée plus ou moins haut par rapport à la ligne $\overline{ab}$. Si elle est placée en $\overline{aa'}$ le pivotement s'effectue par vidange de l'onglet $\overline{aa'b}$. Cet onget fournit un volume d'eau pendant la mise en régime, ce qui permet de satisfaire instantanément la demande (fig. 2).

Si elle est placée en $\overline{bb'}$, le pivotement exige le remplissage de l'onglet $\overline{abb'}$ et la demande en eau ne peut être satisfaite immédiatement; ceci peut entraîner d'autre part une instabilité du fonctionnement des régulateurs. Par contre, la disposition $\overline{aa'}$ conduit à augmenter la revanche du canal.

b) Système à croisement des lignes de niveaux.

Afin de réduire la surélévation des berges exigée par la réserve de fonctionnement des dispositions intermédiaires telles que celle marquée cc' ont été parfois envisagées : au moyen d'une transmission électrique entre M et A on peut essayer de manœuvrer le régulateur A de manière à maintenir constant le niveau en M.

Dans ce cas la réserve hachurée $mc'a'$ sert, pendant la transmission de l'appel de débit entre B et M, à satisfaire la demande. Cependant, entre le moment où une baisse de niveau est détectée en M et le moment où l'ouverture du régulateur A se fait sentir en M, il s'écoule un temps :

$$t = L/2a$$

qui rend tout de même difficile l'acquisition d'une stabilité de fonctionnement et finalement ce dispositif est resté dans les cartons des projeteurs.

Remarquons que ce dispositif à croisement de lignes d'eau peut aussi être obtenu sans télétransmission en plaçant le flotteur détecteur du régula-

teur A dans un rétrécissement où la hauteur cinétique $V^2/2g$ est importante. On obtient alors la disposition des lignes d'eau indiquée sur la figure 3 : la dénivelée ac correspondant alors au $V^2/2g$.

c) Système à ajustement des débits.

Un autre procédé basé sur un large emploi des télétransmissions a été récemment proposé :

Enregistrer les demandes de débit, par exemple l'ouverture de la vanne B, et télécommander la vanne A pour qu'elle affiche aussitôt le même débit que la vanne B. Il s'agit en somme de synchroniser les débits aux différents régulateurs A, B, C, ..., situés sur le canal. Outre que ce système de régulation de débit exige une mise au point délicate pour la stabilité, il demande à être complété par une régulation de niveau : en effet, les mesures de débit comportent toujours une erreur et il y aura toujours une certaine différence positive ou négative entre le débit demandé en B et le débit envoyé en A.

Il faut donc, pour des questions de sécurité contre les débordements ou les mises à sec, placer sur le canal, au point milieu du bief par exemple, un système de détection d'un niveau haut et d'un niveau bas qui actionne les vannes (en priorité sur la régulation des débits) en cas de dépassement de ces cotes extrêmes. On retrouve alors dans une certaine mesure les problèmes de stabilité rencontrés ci-dessus pour le cas de la figure 3.

d) Système à réglage du niveau moyen.

Un autre procédé de régulation a été récemment breveté à SOGREAH : il applique aussi une sorte de synchronisation puisqu'il consiste à attaquer simultanément les régulateurs A et B. Cependant, il s'agit cette fois d'une régulation des niveaux. La figure 4 permet d'en saisir le principe.

En b détection du niveau à l'amont immédiat du régulateur B et télétransmission de ce niveau en b' ; en a détection du niveau à l'aval immédiat du régulateur A et transmission en a' ; un dispositif électrique ou mécanique permet d'obtenir en p la représentation d'une cote moyenne des cotes des plans d'eau en a et b ; c'est cet organe p qui attaque le servo-moteur de la vanne A.

La vanne régulatrice A essaie donc de maintenir à une valeur constante la moyenne des cotes en a et b ; à ce titre, elle se comporte comme le dispositif de la figure 3 : maintien d'une cote fixe au milieu du bief. Cependant, ce système comporte l'avantage suivant : dès qu'un appel de débit apparaît en b sous la forme d'une dépression d le point b' descend de d et le point a' doit monter de d ; donc, à la dépression d correspond aussitôt une surpression d ; ces deux ondes se rencontrent sensiblement au milieu du bief; le basculement de la ligne d'eau a alors lieu en un temps minimal.

La sécurité est automatiquement assurée : à tout risque de montée intempestive de plan d'eau par exemple, correspond aussitôt la dépression qui arrêtera la propagation de l'intumescence.

Par ailleurs, le volume d'eau contenu dans le bief varie peu d'un régime à l'autre et on pourrait parler d'une régulation à volume constant.

Nous pensons finalement que ce système permettra d'appliquer plus facilement la commande par l'aval à certains vieux canaux qu'il est difficile de surélever et pour lesquels on pourrait hésiter à

asservir le fonctionnement aux besoins des consommateurs.

Ainsi donc et pour résumer ces diverses recherches, il semble bien que sous peu, on aura trouvé la combinaison optimale du dispositif de détection et de commande des vannes pour que chaque bief d'un canal s'adapte automatiquement aux demandes de débit en provenance de l'aval et cela dans le temps minimal nécessaire pour que l'hydraulique réalise le basculement des lignes d'eau, c'est-à-dire encore avec des réserves de fonctionnement très faibles.

2. Utilisation des réserves contenues dans les canaux

Parallèlement à ces recherches qui, dans l'ensemble tendaient à trouver la meilleure façon de changer rapidement le débit d'un canal, d'autres études et essais étaient menés pour utiliser le volume d'eau d'un canal à des fins de régularisation. Entre les lignes d'eau à différents régimes d'un canal se situe en effet un volume non négligeable qui peut, moyennant l'adoption d'un système de régulation convenable, être utilisé pour écrêter des pointes des besoins des utilisateurs. On peut imaginer par exemple que le volume compris entre la ligne abc correspondant au débit $Q_{\max}$ en mouvement permanent uniforme et la ligne $a''b''c''$ pourra servir à satisfaire une pointe de demande supérieure à $Q_{\max}$; des régimes transitoires tels que $a'b'c'$ s'établiront; dès que la pointe sera passée et que la demande passera au-dessous de $Q_{\max}$, le système de régulation permettra au régulateur A de passer encore $Q_{\max}$ de manière à reconstituer la réserve (fig. 5).

a) La régulation à niveaux associés.

A notre connaissance, les premières recherches dans ce domaine furent entreprises par M. Petauton vers 1958, sous l'appellation de régulation à niveaux associés. M. Petauton demanda à Neyrpic pour le compte de la C.N.A.B.R.L. de transformer des vannes à niveau aval constant en régulateurs réalisant une association prédéterminée entre les niveaux à l'amont et à l'aval immédiat de la vanne. Puis, les télétransmissions permirent d'améliorer le système, et la régulation à niveaux associés peut maintenant se schématiser de la manière suivante :

Le régulateur B crée à tout moment une perte de charge r telle que la somme de la dénivelée b dans le bief et de r soit constante pour tous débits et égale à J dénivelée du canal. Pour cela, il faut évidemment télétransmettre de A en B le niveau en A de manière que le régulateur B connaisse b par la différence des niveaux en A et B (fig. 6).

Avec un tel système tous les biefs d'un canal participent à la régulation des pointes de demande : l'état des réserves est le même dans tous les biefs et l'ensemble du canal se comporte un peu comme un grand réservoir à fond horizontal.

Chose paradoxale à première vue, si une prise telle que n absorbe une pointe exceptionnelle de débit, non seulement les réserves des biefs amont, mais aussi celles des biefs aval (indirectement) joueront pour que cette pointe soit satisfaite (fig. 6 bis).

2/

3/

4/

5/

6/

6 bis/

7/

b) Les canaux longs et l'arrêt des irrigations la nuit.

Un système de régulation proche du précédent est utilisé depuis fort longtemps et de manière fort simple dans les vieux canaux d'irrigation.

Les réseaux d'irrigation de vallées construits à une époque où les pompes n'existaient pas, présentaient souvent un aspect filiforme : il fallait en effet prendre l'eau loin en amont et on n'irriguait que la bande de terres basses situées le long de la rivière.

On construisait donc des canaux fort longs dans lesquels les délais de transport étaient importants. Le débit envoyé en tête dans ces canaux était constant pendant de longues périodes ; or les irrigations étaient arrêtées la nuit. On pourrait penser qu'il en résultait de fortes pertes d'eau en aval.

En réalité, la figure 7 nous montre que ces pertes étaient cependant très limitées. Sur cet exemple simplifié, nous supposons qu'il y a trois prises A, B, C, qui ouvrent par exemple 8 h chaque jour en appelant un débit identique : q . Lorsque les prises sont fermées, le débit q peut passer dans le canal avec la ligne d'eau parallèle au radier, représentée en trait plein. Lorsque les prises ouvrent, une série de lignes d'eau s'établissent, qui aboutissent à la ligne $aa'bb'cc'$ en fin des 8 h d'irrigation. Si les distances entre A, B et C sont suffisamment longues, les volumes hachurés suffisent à alimenter chaque prise au débit q . Pendant la période d'arrêt de 16 h, les volumes en question se rétablissent progressivement.

On voit donc que de tels canaux peuvent permettre une irrigation de jour, alors qu'ils ne sont calibrés que pour un débit voisin du débit fictif continu (ou débit moyen journalier).

On peut évidemment améliorer ce système en plaçant des seuils dans les canaux en aval immédiat de chaque prise ; on crée alors une réserve supplémentaire au-dessus de la ligne en trait plein mais la hauteur des berges s'en trouve augmentée.

3. La prévision des demandes

Il est certain que si l'on pouvait connaître à l'avance la valeur de l'horaire d'apparition des appels de débit, on serait mieux armé pour faire fonctionner le canal. Il resterait encore des difficultés car le problème des changements de régime (diminution de débit, par exemple, sans pertes d'eau à l'aval) ne serait pas pour autant résolu ; des réserves de fonctionnement seraient donc encore utiles mais on aurait une donnée de base intéressante pour calculer le système de régulation.

C'est ce problème de prévision de demandes que M. Clément développe dans son mémoire publié

dans le numéro spécial de *La Houille Blanche*, n° 5, de 1966. Il préconise une régulation du type « par l'amont » sur programme à court terme actualisé d'une manière continue grâce aux informations recueillies automatiquement sur les variations de la demande. Un système de régulation convenable permet de maintenir la ligne d'eau du canal dans une position telle que toute variation prévisible de la demande dans le temps τ (durée de réponse hydraulique du système) n'entraîne de perte d'eau par déversement ou de déficit (pénurie à une prise) qu'avec une probabilité inférieure, par exemple, à 1 %. Ce système ayant été magistralement décrit par l'auteur dans cette revue, nous renverrons les lecteurs à ce numéro. Ils constateront que si les systèmes de commande par l'aval (ou d'asservissement automatique aux besoins) avec ou sans réserves de régularisation ont fait des progrès, la commande par l'amont vient aussi de s'enrichir d'un système faisant appel aux techniques les plus modernes.

4. Commande par l'amont ou commande par l'aval?

Pour essayer de trouver les raisons d'un choix, plaçons-nous dans des conditions identiques d'emploi pour l'un et l'autre système.

Sauf dans certains cas particuliers, on considère qu'il est moins économique de mettre des réserves de régularisation dans un canal plutôt que dans des réservoirs spécialisés à cet effet. Nous supposons donc que l'on recherche le système qui présente le fonctionnement le plus souple, l'adaptation la plus rapide aux divers régimes, autrement dit un système pour lequel on prévoit dans le canal les seules réserves de fonctionnement.

Le système de « Commande par l'amont à programme actualisé en continu » s'applique aussi à ce cas-là. Il permet d'envoyer une crue à un instant t si l'ordinateur de service calcule que la réserve de fonctionnement ne sera pas suffisante pour pallier, dès le début de son apparition, la pointe de demande susceptible de survenir, avec une probabilité donnée, τ minutes après l'instant t considéré.

Mais ceci présente-t-il un avantage sur un système où on s'arrange pour que, à tout instant, les réserves de fonctionnement se reconstituent de la manière la plus rapide possible (compte tenu des impératifs hydrauliques) et à leur valeur la plus élevée?

Dans la variante de commande par l'aval de la figure 4, par exemple, on s'arrange pour que le volume d'eau contenu dans le bief soit sensiblement constant en régime lentement varié et qu'il soit le plus rapidement reconstitué après un déficit momentané dû à la lenteur de réponse du canal.

À égalité de souplesse, le problème qu'il faut résoudre en définitive est le suivant : lequel des deux systèmes est le plus économique à réaliser?

C'est ici qu'intervient le calcul des dimensions de la cuvette du canal.

— Ces dimensions dépendent d'abord du débit nominal pour lequel le canal sera construit. Il est normal d'admettre pour le canal en commande par

l'aval une probabilité de défaillance (*) du même ordre que celle que l'on admettrait dans l'application du système de « commande par l'amont à programme actualisé en continu ». Le projeteur peut définir un canal en régulation par l'aval tel qu'il y ait défaillance pour certaines pointes exceptionnelles. M. Bauzil prévoyait déjà de tels cas lorsqu'en 1950 environ, il demandait à Neyrpic d'étudier les régulateurs pour commande par l'aval (vannes à niveau aval constant) tels que, en cas de pénurie à l'amont vis-à-vis des demandes, ces régulateurs maintiennent un niveau minimal dans chaque bief. Il existe maintenant des canaux équipés de vannes dites « vannes mixtes » qui assurent la commande par l'aval dans certaines limites : à certaines périodes ce n'est pas le débit demandé qui est distribué à chaque prise mais une fraction du débit disponible, débit qui est alors équitablement réparti entre toutes les prises.

— Les dimensions de la cuvette dépendent ensuite de la revanche et une remarque importante doit être faite au sujet de la revanche supplémentaire exigée par le logement de la réserve de fonctionnement. Les volumes exigés par le système décrit par M. Clément dépendent des hypothèses faites sur les variations des besoins et du temps de réponse du canal. En commande par l'aval classique (fig. 1.1), on avait l'habitude, avant que ne se généralise l'emploi des ordinateurs, de donner à l'onglet de fonctionnement $aa'b$ une valeur supérieure à :

$$Q_{\max} \times \frac{2L}{a}$$

(L : longueur du bief; a : célérité des ondes de débit).

Cette règle empirique suffisait à se garantir contre une instabilité de fonctionnement du système. En réalité, ce volume peut être inférieur à cette valeur et seule une simulation de fonctionnement à l'ordinateur permet d'apprécier correctement la valeur minimale de l'onglet compatible avec la bonne marche du système.

Finalement l'appréciation de la revanche exige de procéder à une étude des régimes transitoires les

plus plausibles. Le résultat de ces investigations sera différent pour chaque canal étudié et on ne peut *a priori* émettre un avis général sur l'avantage d'un système par rapport à l'autre.

On peut aussi dire que les deux systèmes à l'origine fondamentalement différents de commande par l'amont et commande par l'aval se sont, dans leurs améliorations successives, fortement rapprochés.

Un chercheur conserve la commande amont mais place dans le canal aux moments les plus judicieux des réserves qui pallieront l'effet de variations brusques des appels.

Un autre perfectionne la commande aval pour que les réserves de fonctionnement qu'elle nécessite soient limitées au strict minimum nécessaire.

Il est probable qu'un jour ou l'autre on s'apercevra que fouiller une voie ou l'autre conduit à des dimensions de canaux sensiblement analogues.

Conclusion

Le choix définitif d'un système viendra de l'étude détaillée de chaque cas particulier. La facilité avec laquelle les programmes de calcul à l'ordinateur électronique permettent de simuler le fonctionnement d'un canal avec un système de régulation aussi « sophistiqué » que l'on veut, le fait que l'on peut ainsi comparer facilement divers systèmes aux points de vue technique et économique permettent de rechercher pour chaque cas le dispositif le mieux adapté aux conditions locales et en particulier aux variations des besoins : importance de ces variations, fréquence et durée d'apparition, rapidité d'établissement des pointes.

Lorsqu'un certain nombre d'expériences de simulation auront permis de connaître la validité des systèmes en présence et de définir leurs caractéristiques pour qu'ils répondent au mieux à un problème bien déterminé, il est possible que tel système de commande par l'aval comme celui décrit à la figure 4, paraisse très compétitif par rapport au système de commande amont sur programme actualisé en continu. Il aurait alors la faveur des projeteurs qui aiment la simplicité.

(*) Par insuffisance des dimensions.

LA HOUILLE BLANCHE

A L'ÉTRANGER

Bureaux d'abonnement et de vente

AUSTRALIE

Sydney N.S.W.

GRAHAME BOOK COMPANY : 39-49, Martin Place.

BRÉSIL et AMÉRIQUE DU SUD

Rio de Janeiro

« S.O.G.E.C.O. », José Luis Garcia Renalès : Avenida Rio Branco, 9, Sala 218.

CANADA

Montréal 8.PQ

LIBRAIRIE LEMEAC (Messageries France-Canada) : 371, Ouest Avenue Laurier.

ESPAGNE

Madrid

J. DIAS DE SANTOS : Lagasca n° 38.

Madrid

LIBRERIA VILLEGAS : Preciados, 46.

GRANDE-BRETAGNE

London W.C.2.

W.M. DAWSON & SONS LIMITED : Cannon House, Macklin Street.

London W.1.

I.R. MAXWELL Co. : 4-5, Fitzroy Square.

HOLLANDE

Amsterdam C.

MEULENHOF & CIE (Librairie) : Beulingstraat, 2-4.

La Haye

MARTINUS NIJHOFF : 9, Lange Voorhout.

HONGRIE

Budapest 62

KULTURA P.O.B. 149.

INDES

Calcutta 16

FRANCE-ARTS, 33-34 Park Mansions, Park Street.

ITALIE

Bologna

TECHNA: Via San Felice, 28, Casella Postale 503.

JAPON

Tokyo

MARUZEN Co. : 6, Tori-Nichome, Nihonbashi, P.O. Box 605.

MEXIQUE

Mexico D.F.

LIBRERIA VILLEGAS MEXICANA : Santa Ma., La Redonda, n° 209-9.

Mexico D.F.

MANUEL BONILLA (Librairie) : Tiber 38-201.

NOUVELLE-ZÉLANDE

Auckland-Wellington C.2.

R. HILL & SONS : Matlock House, 32, Quay Street.

PORTUGAL

Lisboa

LIVRARIA BERTRAND : 73, Rua Garret.

SUÈDE

Stockholm

A.B. HENRIK LINDSTAHL'S BOKHANDEL : Odengatan, 22.

SUISSE

Lausanne

S.P.E.S., S.A. Librairie et Editions techniques, 1, rue de la Paix.

TCHÉCOSLOVAQUIE

Praha 2

ARTIA : V° Smeckach, 30.

Praha 1

ORBIS (Import-Export) : Narodin, 37.

TURQUIE

Istanbul

LIBRAIRIE HACHETTE : 469, Istiklal Caddesi, Beyoglu.

U.S.A.

New York

MOORE-COTTRELL SUBSCRIPTION AGENCIES INC. : North Cohocton.

VENEZUELA

Caracas

LIBRERIA VILLEGAS VENEZOLANA, Avenida Urdaneta, Esquina Ibarra, Edificio Riera.