DIFFÉRENTS TYPES DE STATIONS DE POMPAGE AUTOMATIQUES

PAR J. VERDIER * ET J. BAGNÈRES **

L'extension des irrigations par aspersion conduit naturellement un maître d'œuvre à concevoir des installations entièrement automatiques qui devront satisfaire sans gardiennage les besoins des bénéficiaires de l'irrigation. Chacun doit pouvoir compter à tout moment sur le débit nécessaire, à la pression voulue, au droit de la borne qui lui est affectée. Si on met à part les réseaux à alimentation gravitaire tributaires soit d'un canal, soit d'une réserve élevée, le plus grand nombre de ces installations est desservi par des stations de pompage automatiques.

Après un examen des données générales du problème à résoudre, nous décrirons quelques-uns des systèmes qui ont été étudiés pour l'équipement des réseaux d'irrigation par aspersion réalisés par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne. Chacun donnera lieu à une analyse des procédés mis en œuvre et à l'indication des avantages et des inconvénients que nous leur connaissons.

Nous donnerons pour finir quelques détails sur les solutions apportées à certains problèmes propres aux stations de pompage pour l'irrigation.

I. Données générales du problème

1. Course caractéristique du réseau.

Un réseau d'irrigation par aspersion, généralement très ramifié, est la plupart du temps très

étendu. C'est dire l'intérêt essentiel de la recherche de l'optimum économique d'un tel équipement.

Supposons donc le réseau « optimisé ». A l'extrémité d'une conduite quelconque, la pression disponible sera, dans tous les cas de fonctionnement, au moins égale à la pression minimale nécessaire au droit des bornes d'irrigation. Le long de cette conduite, le calcul d'optimisation aura déterminé une répartition des diamètres telle que le coût de sa construction soit le plus faible, pour les conditions de débit les plus défavorables. Il est clair que l'on aura alors utilisé toute la charge disponible en tête de la conduite.

Le réseau tout entier sera optimisé quand on aura réparti ainsi toute la charge utilisable dans chaque conduite et dans l'ensemble du réseau pour, le moindre coût. On aura en quelque sorte, utilisé au mieux toute l'énergie disponible, les seules pertes ne provenant que de la limite supérieure imposée aux vitesses d'écoulement.

La courbe caractéristique $H(Q)$ de ce réseau sera l'enveloppe de la valeur maximale de la pression nécessaire et suffisante à la desserte convenable de toutes les bornes ouvertes pour chaque débit appelé. A chacun de ces débits correspond un trajet défavorable dans lequel les conditions de débits maximaux se trouvent réunies. Les premières ramifications naissant dès la sortie de la station de pompage, on constate que l'enveloppe cherchée se place, quelle que soit la valeur du débit appelé, au niveau de la pression caractéristique H_0 correspondant au débit maximal $Q_{\max}$.

Ce n'est que pour les plus petits débits, quand joue, dans les trajets les plus défavorables, la condition de vitesse d'écoulement limite ou quand les

* Ingénieur E.C.L., Chef du Service Travaux de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne.

** Ingénieur I.E.G., Licencié ès-Sciences, Chef de la Section « Usines » à la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne.

bornes considérées sont desservies par une longue tête-morte, que la valeur maximale de la pression nécessaire décroît paraboliquement pour atteindre à débit nul une valeur théorique égale à la somme de la dénivellation topographique maximale et de la pression minimale à réserver au droit des bornes.

Dans ces conditions, et à l'exception de quelques rares cas particuliers, on prendra pour courbe caractéristique du réseau d'irrigation « optimisé » une droite dont l'ordonnée constante a la valeur de la pression caractéristique H_0 à débit maximal $Q_{\max}$.

2. Diagramme du pompage, pression maximale.

Pour une alimentation correcte du réseau à tous les débits, il suffira donc de choisir une ou plusieurs pompes dont les plages de fonctionnement donneront en tout point une pression supérieure ou au moins égale à la pression H_0 .

Il est évident que pour des variations importantes de débit et c'est toujours le cas pour un grand réseau d'irrigation, l'utilisation de plusieurs pompes en parallèle s'impose.

Ces pompes pourront être identiques ou de caractéristiques $H(Q)$ différentes. Suivant les systèmes de régulation employés, les plages de fonctionnement seront plus ou moins étendues; il y aura continuité dans les régimes de pompage ou, pour certaines valeurs du débit appelé, une pompe fonctionnera par intermittence.

En tout état de cause, la pression disponible à la sortie de la station de pompage sera comprise entre la valeur minimale H_0 imposée et une pression maximale H_1 . La « fourchette » de fonctionnement ΔH égale à $(H_1 - H_0)$ est une caractéristique propre à la station. C'est évidemment la valeur de cette fourchette qui va retenir toute notre attention.

Compte tenu de la pression minimale H_0 , de l'importance des surpressions tolérées pour un équipement anti-bélier donné et de la nécessaire fourchette de fonctionnement de la station, les canalisations du réseau pourront être soumises à des pressions maximales de fonctionnement variables suivant les lieux.

Ces pressions maximales nécessitent la mise en œuvre d'un équipement (canalisations et appareillage) adapté à ces charges. On sait que les matériels sont enroutés pour des pressions maximales de valeur ronde, le passage d'un seuil au suivant entraînant une augmentation importante du coût de l'installation.

On cherchera donc à éviter le franchissement d'un tel seuil en fixant la pression maximale de fonctionnement admissible à la plus basse valeur ronde possible. Le régime de pompage le plus défavorable correspondant au niveau d'aspiration le plus élevé et aux plus fortes pertes de charge dans la station elle-même, permettra alors de déterminer la pression maximale H_1 tolérable et la fourchette maximale admissible pour l'installation considérée.

3. Rendement de l'installation.

Il est clair que tout le domaine $H(Q)$ correspondant à la « fourchette » de fonctionnement fournit au réseau des pressions surabondantes pour les conditions les plus défavorables de la demande que doit satisfaire la station. L'énergie dépensée à un

débit donné pour élever la pression à une valeur supérieure à la pression caractéristique H_0 sera dissipée en pure perte par les régulateurs de pression des bornes d'irrigation.

On va donc chercher à réduire autant qu'il sera possible l'importance de cette fourchette.

Pratiquement, pour les différentes solutions envisagées, outre le diagramme de fonctionnement de la station qui superpose à la droite caractéristique du réseau les courbes caractéristiques des pompes débitant en parallèle (voir fig. 1), on tracera la courbe des puissances absorbées en fonction du débit, $W(Q)$, ainsi que la courbe des puissances théoriques nécessaires et suffisantes à l'établissement de la pression H_0 à l'origine du réseau :

$$W_0 = kH_0Q$$

Le rendement réel ρ de l'installation sera donné par le rapport $(W_0/W)(Q)$:

$$\rho = r \frac{H_0}{H} \quad (H \geq H_0)$$

où r et H sont les valeurs du rendement des groupes et de la pression de refoulement pour un débit donné.

Nota: On a tracé en trait discontinu sur le diagramme de fonctionnement les courbes caractéristiques des pompes.

Note: Pump characteristics are dashed lines on operating diagram.

Tableau 1*Différents types de régulation*

RÉGIME	GRANDEURS EXPLOITÉES	TYPE DE RÉGULATION	APPAREILS OU OUVRAGES UTILISÉS
DISCONTINU	Niveaux étagés	sur réservoir à l'air libre; avec réservoir à air comprimé.	réservoir en un point quelconque du réseau.
	Pression	manométrique simple; manométrique compensée (système Vögel).	réservoir hydrophore; hydrophore et organe déprimogène.
	Pression et débit	manométrique asservie au débit (système CdC).	hydrophore et débitmètre.
	Niveaux fixes	manométrique à temporisation.	hydrophore et platine chronométrique.
CONTINU	Pression ou débit	à vitesse variable.	moteurs à vitesse variable.
	Débit ou vitesse	débitmétrique.	débitmètres de types variés.

On voit bien que s'il est nécessaire de rechercher un matériel de haut rendement propre — et de l'utiliser au voisinage de l'optimum de ce rendement, — il est tout aussi important de mettre en œuvre des systèmes de régulation qui ont pour effet de réduire la fourchette de fonctionnement.

Cela pourrait s'obtenir soit en choisissant de préférence des pompes à courbe caractéristique à faible pente (« caractéristiques plates »), soit en utilisant de courtes plages sur des courbes caractéristiques à plus grande pente, souvent au prix de la multiplication du nombre de machines si, comme nous le verrons, on veut éviter l'emploi de gros réservoirs.

Toute étude de régulation va donc s'articuler autour de la recherche des meilleurs rendements ρ de l'installation, restant préservées la sécurité de fonctionnement, la commodité et l'économie de l'exploitation, ainsi que l'économie relative de l'investissement.

4. Généralités sur les régimes de fonctionnement.

Une demande naissant sur le réseau, il convient en définitive d'obtenir du système de régulation choisi qu'il provoque le fonctionnement du nombre de pompes nécessaires à sa satisfaction. Les variations en plus ou en moins de la demande entraîneront la mise en route ou l'arrêt successif de nou-

veaux groupes chaque fois que le débit appelé nécessitera le passage d'une plage de fonctionnement à une autre. Chaque station aura ainsi un régime de fonctionnement propre.

On peut distinguer en fait deux grandes familles de type de régulation :

- celle dans laquelle on utilise un réservoir auxiliaire pour compenser une différence entre le débit appelé et le débit pompé — ce sont les régulations à régime discontinu;
- celle dans laquelle à chaque débit appelé correspond un point caractéristique $H(Q)$ stable d'un ou de plusieurs des groupes en parallèle (il y a alors « recouvrement des plages de fonctionnement ») — ce sont les régulations à régime continu.

On notera que pour les régulations à régime discontinu, il est fréquent d'obtenir le recouvrement des plages pour les plus forts débits, tandis que pour les régulations à régime continu, on utilise le plus souvent un groupe de démarrage à fonctionnement intermittent dans la zone des faibles débits.

Le tableau 1 ci-contre donne une classement des différents types de régulation étudiés par la Compagnie, dont la plupart ont donné lieu à la réalisation d'installations en exploitation depuis plusieurs années.

Dans tous les cas, on a recours à un réservoir qui est sollicité au moins pour le démarrage de l'installation et la desserte des petits débits et chaque fois que le débit appelé se situe en dehors des plages de fonctionnement stable des groupes. Il se remplit et se vide successivement pour compenser sur le réseau l'excès ou l'insuffisance du débit pompé, la pression variant entre les deux valeurs des pressions d'enclenchement et de déclenchement de la pompe qui « bat ».

5. Détermination du volume du réservoir.

Désignons par q_m le débit moyen fourni par la pompe qui bat entre ces deux valeurs extrêmes de la pression. On trouvera dans un numéro de la revue *L'Eau*, la valeur approchée qu'en propose M. Valibouse :

$$q_m = \frac{2}{3} \frac{q_1^2 + q_1 q_2 + q_2^2}{q_1 + q_2}$$

où q_1 et q_2 sont les valeurs des débits pompés pour les deux pressions extrêmes de déclenchement et d'enclenchement H_1 et H_2 .

Si n groupes identiques en fonctionnement simultané sont insuffisants pour satisfaire une demande de débit Q du réseau et $(n+1)$ groupes surabondants, le cycle du « battement » durera un temps T fonction de q_m , débit moyen du groupe qui bat et de V_u volume de la tranche d'eau utile du réservoir dite « tranche de régulation ».

$$T = V_u \left(\underbrace{\frac{1}{Q - n q_m}}_{\substack{\text{vidange} \\ \downarrow \\ \text{déclenchement} \\ \text{à pression} \\ \text{maximale}}} + \underbrace{\frac{1}{(n+1) q_m - Q}}_{\substack{\text{remplissage} \\ \downarrow \\ \text{enclenchement} \\ \text{à pression} \\ \text{minimale}}} \right)$$

La valeur minimale T_0 du temps T s'obtient pour le débit appelé :

$$Q = \frac{2n+1}{2} q_m$$

elle est liée au débit moyen et au volume utile V_u par la relation :

$$V_u = \frac{T_0 q_m}{4}$$

Pour une « fourchette » donnée déterminant q_m et une fréquence de battement donnée imposée par le mode d'exploitation du matériel électrique, déterminant un intervalle minimal acceptable T_c , on voit que le volume utile devra respecter la condition :

$$V_u \geq \frac{T_c q_m}{4}$$

La valeur obtenue pour V_u donnera directement le volume utile à retenir pour un réservoir à air libre, compte non tenu des tranches supplémentaire nécessaires au repérage des niveaux étagés de l'enclenchement et du déclenchement des différents groupes.

Si la régulation se fait au moyen d'un réservoir à air comprimé, le volume minimal de la cuve sera déterminé par application de la loi de Mariotte entre les deux niveaux extrêmes correspondant aux pressions extrêmes d'enclenchement et de déclenchement de la pompe qui bat :

$$(H_2 + h_a) V = (H_1 + h_a) (V - V_u),$$

d'où l'on déduit en fonction de T_c , de q_m et de $\Delta H = H_1 - H_2$:

$$V \geq \frac{T_c q_m}{4} \cdot \frac{H_1 + h_a}{\Delta H}$$

Il faudra bien sûr tenir compte du volume inférieur de sécurité et du volume correspondant aux écarts de réglage des manostats affectés à l'enclenchement et au déclenchement des différents groupes pour fixer en définitive le volume V nécessaire.

6. Fractionnement du pompage.

Nous avons déjà vu que l'économie du pompage s'obtient par la recherche d'une fourchette aussi faible que possible. Cette condition va donc entraîner l'adoption de réservoirs relativement grands et coûteux. On est donc conduit à agir sur les autres termes qui influent sur la valeur de V , si l'on veut éviter cet inconvénient.

S'il est difficile de réduire la valeur de T_c pour des raisons d'exploitation, il est loisible de diminuer celle de q_m par l'adoption d'un nombre de pompes plus grand lorsqu'elles sont toutes identiques, ou par le choix de pompes de plus petites caractéristiques s'intercalant dans les diagrammes de pompage dans les zones de fonctionnement discontinu.

On pourra trouver un fractionnement raisonnable en tenant compte par ailleurs de l'augmentation du

coût de l'installation par le calcul des « valeurs actuelles » des différentes solutions envisagées, du calibre industriel de l'appareillage électrique et des hypothèses faites sur le régime des demandes du réseau.

7. Incidences sur le réseau électrique.

Les stations de pompage étant raccordées fréquemment sur des réseaux ruraux de faible capacité, les appels de puissance importants aux démarrages risquent de compromettre la bonne marche des installations desservies, par les chutes de tension qu'ils provoquent.

En particulier, les phénomènes de « flickers » produits sur le réseau d'alimentation peuvent être très gênants.

On cherchera par conséquent à réduire autant que possible l'appel de courant au démarrage par l'emploi de dispositifs de démarrage par résistance statorique ou par auto-transformateurs.

Cette remarque nous conduit aussi à éviter autant que possible les démarrages trop fréquents en recherchant des systèmes de régulation qui laissent aussi peu de place que possible aux zones de fonctionnement discontinu.

On rappellera à ce propos que, dans le but de réduire le volume des cuves de régulation, on a eu souvent recours à un artifice électrique qui a pour effet d'effectuer automatiquement une permutation circulaire dans l'ordre d'enclenchement des groupes à chaque nouvelle sollicitation. Cette formule très séduisante en soi — à qui il reste le mérite de répartir régulièrement les durées de fonctionnement des groupes — a le gros inconvénient d'augmenter exagérément la fréquence des démarrages. A titre d'exemple, pour une station équipée de 6 groupes pour lesquels on aurait retenu une valeur T_c correspondant à 10 démarrages par heure, on pourrait théoriquement calculer le volume de la cuve pour un cycle de battement de 1 minute, soit une fréquence de démarrages de la station de 60 par heure. Cette pratique est incompatible avec les possibilités des lignes existantes; elle conduit d'autre part à une fatigue exagérée des installations.

8. Critères de choix d'une solution.

Il va de soi que toutes les pompes ne s'adaptent pas indifféremment à n'importe quel type de régulation. Si des pompes à « caractéristique plate » conviennent parfaitement à une régulation débitmétrique, elles sont inutilisables pour une régulation manométrique, en raison des trop faibles écarts de pression qu'elles permettent du réglage des pressions de régulation d'une pompe à celui de la suivante.

Pour une station donnée, on va donc se trouver en présence de plusieurs solutions proposant un type de régulation particulièrement adapté à telle pompe courante de tel constructeur. Chacun conduira à un rendement propre $\rho(Q)$ de l'installation et à un montant d'ensemble A de l'investissement à réaliser, incluant outre l'appareillage électromécanique, les ouvrages de génie civil, l'appareillage électrique et l'appareillage hydraulique et de régulation. Le premier terme $\rho(Q)$ influe sur le

coût de l'exploitation, le second sur l'amortissement des ouvrages.

Il est de règle en pareil cas de faire appel au calcul classique d'actualisation qui a le mérite de permettre une comparaison entre différentes solutions par la prise en compte simultanée du coût de l'exploitation et de celui du premier investissement. On peut aussi tenir compte — mais cela nécessite l'expérience de plusieurs années de fonctionnement — du coût de l'entretien si l'on estime que tel matériel est plus fragile qu'un autre pour une même utilisation.

Le prix de revient actualisé sur cinquante ans, durée de vie adoptée pour le calcul — les durées d'amortissement sont évidemment plus courtes — est la somme :

— d'un terme qui dépend de la valeur des investissements et des charges d'entretien qui leur sont proportionnels;

— et d'un terme qui se rapporte à la consommation :

$$A_0^0 = K_1 I_{SP} + K_2 G$$

S'il est aisé de calculer le premier terme, le second ne peut l'être qu'après le choix des hypothèses les plus probables d'utilisation de la station au cours de la période considérée. Il est évident que seule une expérience de plusieurs années permettra de préciser l'évolution des demandes au cours d'une année donnée et suivant les progrès de l'irrigation au cours du temps dans un secteur donné.

On pourra alors tracer la courbe des débits classés $Q(t)$ appelés par le réseau. Au cours d'une année pendant laquelle S_i hectares auront reçu une quantité d'eau V dans la période de p jours de la campagne d'irrigation, le volume VS_i aura été pompé. Ce volume représente la valeur de l'intégrale définie de la courbe des débits classés :

$$\int_0^p Q(t) dt = VS_i$$

A chaque valeur du débit, nous le savons, correspond une valeur de la puissance absorbée. On peut donc aussi tracer la courbe des puissances absorbées classées dont l'intégrale définie :

$$\int_0^p W(t) dt,$$

est la consommation annuelle en énergie de l'installation.

La valeur du prix de revient actualisé prendra alors la forme suivante :

$$A_0^0 = K_1 I_{SP} + K_2 \cdot c \int_0^p W(t) dt$$

où c est le prix moyen du kWh.

Dans la pratique, on appréciera le rendement moyen ρ de l'installation pour chaque solution proposée. La consommation en kWh au cours de l'année de rang n aura la valeur approchée suivante, exprimée en kWh :

$$G_n = 3.10^{-3} \cdot \frac{V_n H_0}{\rho}$$

où V_n est le volume pompé à l'année n exprimé en m^3 .

Le prix de revient actualisé de la consommation s'exprime par la formule approchée :

$$G = 3.10^{-3} \cdot \frac{V_0 H_0}{\rho} \cdot c \cdot \sum_1^{50} \frac{V_n}{V_0} \cdot \alpha_n$$

où V_0 est le volume annuel nécessaire à l'irrigation du secteur à complet développement et α_n le coefficient d'actualisation de l'année n :

$$\alpha_n = \frac{1}{(1+t)^n}$$

t étant le taux d'actualisation retenu.

D'une solution à une autre, seules la valeur de ρ et celle de I_{SP} sont variables et on comparera pour finir des sommes de la forme :

$$A_0^0 = K_1 I_{SP} + K_2 \cdot \frac{1}{\rho}$$

On constate que le second terme est souvent prépondérant dans la comparaison.

II. Les régulations à régime discontinu

1. Rappel de solutions classiques.

Avant d'aborder le chapitre des stations hydrophores à régime discontinu, nous rappellerons brièvement les solutions classiques adoptées soit en irrigation, soit en adduction d'eau.

Il s'agit essentiellement des régulations sur château d'eau. Elles présentent l'intérêt d'une grande simplicité et conduisent à un rendement excellent de l'installation. On peut en effet choisir une fourchette de régulation relativement faible, grâce à un repérage précis des niveaux et fonctionner sur la plage de rendement optimal des pompes.

Elles ont souvent l'inconvénient d'accroître le coût de l'aménagement.

En effet, à défaut de disposer auprès de la station d'un site topographique favorable, il faudra construire un réservoir de grande hauteur ou rechercher assez loin une implantation plus favorable. Cet éloignement nécessitera la mise en place d'une ligne pilote coûteuse et provoquera par ailleurs un accroissement du coût du réseau lui-même.

Notons que les relais Gourdin fréquemment utilisés en adduction d'eau pour de faibles puissances et souvent pour la commande d'une seule pompe risquent de très mal fonctionner pour de gros débits d'eau brute.

2. Régulation manométrique simple.

Ce type de régulation a pour principe le repérage, par des manostats, de pressions variables dans une cuve à air comprimé (calcul défini au chapitre précédent).

Pour des raisons de commodité d'exploitation, on adopte des pompes de caractéristiques identiques. A chacune est associé un manostat dont le réglage

2/ Diagramme de fonctionnement en régulation manométrique simple avec relais Evomat.

Operating diagram for simple control by pressure switch and Evomat relay.

- Schéma de fonctionnement du relais Evomat
- Diagrammatic operation of Evomat relay

- Diagramme de fonctionnement dans le temps
- Time sequence of operation

3/

4/ Manostat compensé Vögel.
Vögel compensated pressure switch.

fixe la plage de fonctionnement, déterminant les fourchettes individuelles AB, CD, et EF (fig. 2).

La différence de pression ($H_A - H_F$) définit la fourchette globale de l'installation.

Les valeurs de réglage des manostats seront évidemment décalées d'un groupe à l'autre pour éviter le fonctionnement intempestif de l'installation au voisinage des pressions de réglage.

Fonctionnement.

Le fonctionnement très simple dépend de la valeur Q du débit appelé par le réseau :

- si $Q < Q_A$: la première pompe « bat » sur le réservoir, la fréquence de battement étant fonction de la fourchette ($H_A - H_B$), du volume de la cuve et du débit du réseau;
- si $Q_A < Q < Q_B$: la station se stabilise sur le point caractéristique correspondant (H, Q);
- si $Q_B < Q < Q_C$: la seconde pompe « bat » dans les mêmes conditions que précédemment, la pompe n° 1 étant en marche continue;

etc.

Diminution du volume de la cuve.

Avec ce système de régulation, les pompes de « caractéristiques » à pente forte donneront pour un débit donné une meilleure définition de la pression. Les plages de fonctionnement détermineront alors d'étroites zones de débit à régime stable. Le réservoir sera donc fréquemment sollicité.

Son volume minimal, nous le rappelons, est donné par la relation :

$$V = \frac{T_c q_m}{4} \cdot \frac{H_1 + a}{\Delta H}$$

expression dans laquelle :

- q_m sera relativement grand en raison de la forme des « caractéristiques »;
- ΔH sera aussi petit que possible pour éviter un trop faible rendement.

Le réservoir sera donc la plupart du temps assez important, donc coûteux.

Le constructeur autrichien Vögel a imaginé un artifice intéressant qui permet de s'affranchir de cette contrainte. Il consiste à introduire, dans le relayage de commande des groupes, l'appareillage spécial dit système « Evomat ».

Cet appareillage agit sur l'arrêt des pompes par la combinaison de deux relais temporisés en série avec le manostat de commande, suivant le schéma n° 3. En pression basse, le manostat se ferme, excite A, dont l'auto-alimentation passe par un contact temporisé à l'ouverture de B. Le diagramme de la marche des pompes que l'on obtient est indiqué sur la figure 2.

Nous voyons que si les temps entre deux ouvertures successives de manostat sont inférieurs au temps T de temporisation du relais, la pompe continuera à tourner jusqu'à la fin du temps de réglage, quelles que soient les sollicitations du manostat de commande. Par contre, si les intervalles de temps séparant deux fermetures du manostat sont supérieurs à T , le relais B aura le temps de se désactiver et la pompe sera normalement arrêtée par l'ouverture du manostat. En résumé, l'intervalle entre deux déclenchements successifs de la pompe sera

toujours supérieur ou égal au temps de réglage choisi.

La fréquence maximale de battement des groupes n'est donc plus déterminée par la taille du réservoir mais par l'appareillage « Evomat ». On peut donc, sans inconvénient pour le fonctionnement, diminuer le volume de la cuve.

Mais alors la pression maximale de refoulement n'est plus définie par le réglage « haut » du manostat, car après son ouverture la pompe continue à tourner et la pression à monter jusqu'à coupure par Evomat.

Il s'ensuit évidemment une diminution du rendement de l'installation et des contraintes supplémentaires sur l'appareillage du réseau.

On notera aussi que si le volume de la cuve a été réduit de façon exagérée, certains débits appelés provoqueront la remontée de la pression au voisinage de la pression à vanne fermée. Outre les risques d'instabilité que cela entraîne, il deviendra pratiquement impossible de régler les protections contre les désamorçages qui utilisent des relais de puissance (type RM 6 par exemple).

Le système est cependant efficace par la sûreté de fonctionnement qu'il procure; il est simple et parfaitement adapté aux petites installations.

Commande du compresseur.

Le renouvellement de l'air dissous au contact de l'eau dans la cuve se fait très classiquement par mise en route du compresseur pour une durée donnée au passage en niveau haut (« niveau trop haut »).

Dans le cas où le système Evomat est employé, on doit bien sûr, recourir à un autre procédé. L'apport d'air dans la cuve se fait alors en comparant à chaque enclenchement de pompe, le niveau de l'eau avec son niveau normal. Si le niveau n'est « pas assez bas », un contact en série avec le manostat de commande met en service le compresseur pour un temps déterminé.

Critique du système de régulation.

Dans l'ensemble, ce type d'installation a l'avantage d'une grande simplicité. Il est peu coûteux en appareillage et en relayage et les frais d'entretien sont réduits.

Cependant, il présente l'inconvénient d'entraîner un mauvais rendement ρ qui a conduit à l'abandonner dans le cas de stations de quelque importance.

La fourchette globale de l'installation F est en effet importante.

Ceci résulte essentiellement de la faible sensibilité des manostats les plus courants qui ne permettent pas d'adopter, pour les écarts ($H_n - H_p$), ($H_n - H_p$), des valeurs inférieures à 300 millibars si on veut éviter les démarrages ou les arrêts intempestifs au niveau des pressions de réglage.

Si, par exemple, la station contient 4 pompes, on perdra 900 millibars qui s'ajouteront à la fourchette individuelle des pompes dont la valeur est couramment comprise entre 1,5 et 2 bars.

Dans ces conditions, F sera comprise entre 2,4 et 2,9 bars, valeur importante qui peut entraîner :

— le dépassement de la pression maximale admissible sur le réseau;

— une perte d'énergie importante correspondant à l'aire hachurée sur la figure 2. Elle conduit à un faible rendement de l'installation en dépit du haut niveau de rendement des pompes elles-mêmes ($0,40 < \rho < 0,60$).

Aussi, nous avons été conduits à ne retenir ce type de régulation que pour des stations de petite capacité dans lesquelles le nombre de groupes était inférieur ou égal à 3.

Pour les stations plus importantes, on cherchera à réduire la fourchette globale de régulation. C'est pourquoi nous avons adopté les procédés suivants qui sont apparentés à la régulation manométrique simple :

- régulation par manostats asservis au débit (procédé Jeumont-Vögel);
- régulation à fourchette constante (même pression de réglage pour toutes les pompes) :
 - régulation manométrique avec enclenchements temporisés (procédé KSB-SEREA),
 - régulation manométrique avec asservissement au débit (procédé Compagnie des Compteurs).

Ces trois dispositifs ont été réalisés dans nos installations ou sont en cours de l'être. Nous en donnons une description dans les paragraphes qui suivent.

3. Régulation par manostats asservis au débit (procédé Jeumont-Vögel).

Le constructeur autrichien Vögel a eu l'idée de réduire la fourchette globale F en agissant par un artifice hydraulique sur les écarts imposés par les sensibilités des manostats.

Pour y parvenir, ce constructeur a mis au point un manostat spécial représenté schématiquement sur la figure 4, dit « manostat compensé ». Son principe consiste à retrancher à la force exercée par la pression H de refoulement de la station sur le ressort du manostat, la force de sens contraire résultant de la dépression ΔH engendrée par un venturi situé à la sortie de la station.

La force résultante appliquée au ressort est de la forme :

$$\phi = aH - b\Delta H$$

La dépression ΔH étant proportionnelle au carré du débit, il vient :

$$\phi = aH - cQ^2$$

A chaque manostat, on peut assigner une pression d'enclenchement et une pression de déclenchement fixées par la tension ϕ du ressort (réglable à l'aide de deux molettes indiquées sur la figure 4) :

$$\phi = k(x_0 - x)$$

En définitive, alors que la « caractéristique » d'un manostat simple est indépendante du débit (droite à ordonnée constante), celle du manostat « compensé » est une parabole d'équation :

$$H = A(x_0 - x) + BQ^2$$

On voit tout le parti qu'on peut tirer de l'ajustement correct des pressions de réglage. Il est en effet toujours possible de choisir l'organe déprimogène

5/ Régulation manométrique compensée (procédé Jeu-mont-Vögel).

Compensated pressure switch regulation (Jeu-mont-Vögel method).

qui permettra de placer toutes les pressions d'enclenchement au voisinage de la courbe caractéristique du réseau et de n'être assujéti qu'au choix d'une fourchette individuelle convenable.

Le schéma de régulation prend alors l'allure qui est indiquée à la figure 5.

L'équipement des stations qui utilisent ce procédé est la plupart du temps complété par l'emploi du système Evomat.

Critique du système.

Ce dispositif conduit à une réduction sensible de la fourchette de fonctionnement par élimination de l'incidence des écarts de réglage. C'est un procédé simple et peu coûteux. Il nécessite évidemment l'emploi d'un organe déprimogène, mais celui-ci est utilisé aussi pour la mesure du débit.

Cependant, la réalisation technologique de ces manostats reste imparfaite. Les contacts se font à l'aide d'ampoules de mercure, assez sensibles aux variations brusques de pression dues aux démarrages ou aux arrêts des pompes. Les membranes sont souvent mal adaptées aux pressions importantes des réseaux d'irrigation.

Des mises au point sont en cours à l'heure actuelle, en collaboration avec les constructeurs. Les améliorations apportées confirmeront l'intérêt d'un dispositif séduisant tant par sa simplicité que par son faible prix de revient.

4. Régulation à fourchette constante et temporisation (procédé Serea-KSB).

Principe de fonctionnement.

Au lieu d'affecter un manostat à chaque pompe, on n'utilisera pour toutes qu'un seul repérage de pression « haut » et « bas ». Ce repérage est réalisé en fait par une lecture de niveau dans le réservoir hydropneumatique.

Le niveau bas provoquera les enclenchements des groupes, le niveau haut donnera l'ordre d'arrêt.

L'ordre d'enclenchement met en route un programme de démarrage successif des groupes dans un ordre déterminé et à des intervalles de temps réguliers fixés par un ensemble de relais temporisés (par exemple toutes les 7 s).

A l'inverse, quand le signal d'arrêt est donné par passage en niveau haut, le programme déclenche successivement les groupes dans l'ordre contraire.

Précautions particulières.

Comme on le voit, le principe est très simple, mais il nécessite toutefois certaines précautions.

1° Pour donner des indications fidèles et afin de rester dans les plages de fonctionnement imposées, le repérage des niveaux doit être absolument rigoureux et correspondre exactement aux pressions voulues.

Pour obtenir ce résultat, on équipe la station de trois organes essentiels :

- une vanne motorisée isolant la station du réseau;
- une électrovanne d'injection d'air dans le réservoir;
- un dispositif de démarrage à débit nul indépendant de la régulation normale.

Ce dispositif fonctionne de la manière suivante. Lors de la remise en route de la station, soit volontaire, soit à la suite du retour du courant ou d'un effacement de défaut, la vanne motorisée se ferme si elle ne l'était pas déjà. La station se trouve donc isolée du réseau. Une pompe remonte le niveau dans le réservoir en position haute, puis s'arrête. L'électrovanne asservie à la marche du compresseur s'ouvre jusqu'à ce que la pression dans le réservoir atteigne la pression caractéristique du niveau haut.

Cette préparation terminée, la vanne motorisée s'ouvre progressivement et la régulation normale entre en service.

En cours de marche normale de l'installation, sur un signal de niveau déterminé, on compare la valeur de la pression à la valeur de consigne et l'on fait un appoint, si nécessaire, par mise sous tension de l'électrovanne d'injection d'air.

2° Il existe un certain décalage entre l'ordre donné par les niveaux de réglage et le moment où le niveau de l'eau évolue dans la cuve. Il n'est donc pas certain qu'on puisse ajuster exactement le nombre de pompes à la demande qui a provoqué l'ordre et on court le risque d'un pompage de l'installation.

Pour obtenir l'ajustement voulu et stabiliser ainsi le fonctionnement, on complète l'équipement par un dispositif qui consiste à placer dans la tubulure de sortie du réservoir une palette indiquant le sens d'écoulement de l'eau.

Dès que le sens de l'écoulement s'inverse, le contact associé à la palette arrête le programme de mise en route ou d'arrêt des groupes suivant le cas.

Fractionnement.

Comme pour les régulations précédentes et pour des raisons analogues, on a cherché à réduire le volume de la cuve. Dans le cas présent, on agit à la fois sur le terme q_m et sur le temps T_c .

L'action sur q_m est obtenue en utilisant deux types de pompes dont les plus petites ont un débit moitié de celui des pompes principales. Les « battements » se font toujours sur les petites. Les pompes principales ne sont en service que lorsqu'on est assuré de leur marche stable.

L'action sur T_c est obtenue en permutant les

ordres d'enclenchement des petites pompes lorsqu'elles sont amenées à battre.

Le fonctionnement d'une station ayant deux pompes de débit q et trois pompes de débit $q/2$ est illustré par la figure 6.

Désignant par A, B, C les petites pompes et par P et Q les pompes principales, le programme de mise en service sera le suivant :

0 / A / A + B / P / P + A / P + A + B / P + Q / P + Q + A / P + Q + A + B / P + Q + A + B + C.

Dans une zone d'appel de débit à régime intermittent, le type de fonctionnement sera par exemple le suivant :

P + Q + A / P + Q / P + Q + B / P + Q / etc.

Critique du système.

La fourchette globale de la station est réduite au maximum compatible avec un fonctionnement normal des pompes. Il s'ensuit une faible augmentation de pression par rapport à la pression caractéristique du réseau et un excellent rendement de l'installation.

Par contre, l'automatisme est relativement complexe. Il nécessite un repérage de niveaux extrêmement précis, une revérification périodique des conditions au démarrage de la station, et l'emploi d'un grand nombre de relais. Les risques de panne sont donc plus nombreux que dans les solutions classiques.

Ce sont les raisons pour lesquelles, après avoir fait l'essai en relayage classique, nous avons orienté la Société Serea vers l'utilisation de relayage stati-

6/ Régulation chronométrique sur niveaux (procédé SEREA-KSB).
Time regulation by water levels (SEREA-KSB method).

que à transistors. Ce système a le gros avantage de ne mettre en œuvre aucune pièce mobile et d'éliminer totalement les usures dans un automatisme où le matériel est fortement sollicité.

Lorsque les mises au point sont bien faites, cette forme de régulation donne satisfaction.

5. Régulation sur manostats et débitmètre associés (procédé CdC).

Nous comptons prochainement mettre en œuvre ce nouveau procédé dans une de nos stations après sa mise au point sur un prototype réalisé en liaison avec nous dans les ateliers de la Compagnie des Compteurs et dont les essais sont très encourageants.

Fonctionnement.

Le diagramme de fonctionnement des pompes s'établit entre deux limites de pression relativement rapprochées, correspondant à une pression d'enclenchement égale à la pression caractéristique du réseau et à une pression haute de déclenchement. Un manostat détecte ces limites et donne des ordres de mise en service ou d'arrêt suivant le cas.

D'autre part, un débitmètre, placé à la sortie de la station, analyse à tous moments les variations de demande du réseau et fixe le nombre de groupes nécessaire à la satisfaction de cette demande suivant l'allure du diagramme de fonctionnement.

Dès la mise en route, la première pompe est ainsi « avertie »; elle obéit ensuite aux sollicitations du manostat. Lorsque le débit appelé atteint le maximum de débit d'une pompe, une seconde à son tour pourra se mettre en route quand le manostat donnera un ordre d'enclenchement, etc.

On peut dire en schématisant les choses, que l'ordre de mise en route ou d'arrêt d'un groupe, préparé par le débitmètre, est confirmé par le manostat.

Pratiquement, la commande est réalisée par l'addition de deux courants :

- un courant ip élaboré à l'aide d'un circuit dans lequel sont mises ou non en série des résistances permettant une variation brusque de sa valeur, suivant la position du manostat (ip varie entre deux valeurs discrètes ip_1 et ip_2);
- un courant iq élaboré à partir du débitmètre par l'intermédiaire d'un amplificateur (iq varie linéairement en fonction du débit).

La fonction $(ip + iq)$ est représentée par deux droites haute pression et basse pression.

La somme des courants $(ip + iq)$ passe dans les circuits des relais R_1, R_2, R_3 , auxquels sont associées les pompes P_1, P_2, P_3 . Les plages de fonctionnement des relais se situent entre les deux droites $(ip_1 + iq)$ et $(ip_2 + iq)$.

La figure 7 représente le diagramme de fonctionnement de ce type de régulation. Dans les intervalles $0-Q_A, Q_B-Q_C, Q_D-Q_E$, le régime est discontinu; la $n^{\text{ème}}$ pompe soumise aux sollicitations du manostat est en fonctionnement intermittent.

Dans les intervalles $Q_A-Q_B, Q_C-Q_D, Q_E-Q_F$, le régime est stable. Au voisinage des débits Q_1, Q_2 et Q_3 compris dans ces intervalles, les valeurs prises par le courant iq (iq_1, iq_2, iq_3) sont suffisantes pour

verrouiller à elles seules successivement les relais R_1, R_2, R_3 associés à chacun des trois groupes.

Critique du système.

Cette régulation présente l'intérêt d'une grande simplicité dans sa réalisation. La fourchette est très faible et conduit à un rendement excellent. Le relaiage est simple.

Le débitmètre utilisé n'a pas besoin d'être d'une grande précision, puisque seule nous intéresse l'évaluation d'une plage de débit. L'emploi d'un simple diaphragme suffit. Le courant iq alimentant R_1, R_2 et R_3 alimente également l'enregistreur et le totalisateur de débit dont la présence est par ailleurs nécessaire dans toute station de pompage.

III. Les régulations à régime continu

Nous rappelons qu'il s'agit des régulations ayant pour principe l'adaptation à chaque instant du débit de la station de pompage au débit demandé par le réseau.

Deux principaux dispositifs peuvent être employés à cet effet :

- la régulation débitométrique classique;
- la régulation qui utilise des groupes à vitesse variable.

Si nous avons l'expérience de réalisations de stations de pompage dont la régulation utilise un débitmètre, nous n'avons pas retenu le second dispositif. Son étude a montré, en effet, qu'il était mal adapté à nos réseaux.

1. Régulation débitométrique.

Fonctionnement.

Alors que tous les systèmes de régulation examinés jusqu'ici ont utilisé la mesure d'une grandeur (pression ou niveau) dont la variation résulte de la variation du débit appelé, c'est cette variable directement qui est maintenant exploitée.

A chaque demande du réseau correspond un point de fonctionnement stable de la station de pompage. Si le débit augmente, le point de fonctionnement décrit la courbe caractéristique de la pompe ou des pompes en parallèle.

Lorsque le débit atteindra la valeur pour laquelle la pression de refoulement est égale à la pression caractéristique H_0 du réseau, le débitmètre délivrera l'ordre d'enclenchement d'une pompe supplémentaire. La pression remontera alors rapidement jusqu'à la valeur qui correspond au nouveau débit appelé par le réseau.

Une diminution du débit occasionnera un déplacement du point de fonctionnement en sens inverse. De la même manière, le débitmètre donnera les ordres de déclenchement nécessaires.

La figure 8 illustre le fonctionnement d'une station de pompage suivant ce principe.

Pour éviter l'instabilité du fonctionnement au voisinage des débits d'enclenchement des pompes, on décalera les ordres de déclenchement à des valeurs du débit sensiblement inférieures aux précédentes.

- Diagramme de fonctionnement de la régulation sur manostat et débitmètre associés (procédé CdC).
 - Regulation by associated pressure switch and flowmeter (CdC method).

- Principe de la commande - Control principle

1/

Il y aura « recouvrement » des plages de fonctionnement.

On voit bien que ce procédé nécessite l'emploi de pompes à « caractéristique plate » pour obtenir sans difficulté le recouvrement des plages. Ceci va aussi dans le sens de l'augmentation du rendement de la station grâce à la diminution de la fourchette qui en résulte. Il faudra simplement s'assurer que les plages de fonctionnement utilisées correspondent à l'optimum de la colline de rendement des groupes eux-mêmes.

Il est clair que ce procédé ne peut être appliqué avec efficacité que si la mesure du débit est correcte. Il faut disposer d'un appareillage de bonne précision sur toute l'étendue de mesure et de grande fidélité. Ces conditions réagissent sur l'étendue des « recouvrements » et sur l'ajustement du diagramme de pompage à la courbe caractéristique du réseau.

Il est donc nécessaire de disposer d'un excellent appareillage débitmétrique.

Débitmètre.

La plupart des débitmètres utilisables sont des manomètres différentiels placés sur des organes

8/

9/

- 1/ Diagramme de fonctionnement de la régulation sur manostat et débitmètre associés (procédé CdC).
 Regulation by associated pressure switch and flowmeter (CdC method).

8/ Régulation débitmétrique. - Regulation by flowmeter.

9/ Schéma du débitmètre Rittmeyer. - Rittmeyer flowmeter.

déprimogènes (diaphragme ou venturi) intercalés sur le collecteur de refoulement. On conçoit que la mesure soit très imprécise pour les débits faibles, à moins de choisir un organe déprimogène à très grande perte de charge pour le débit maximal. Ce serait un nouvel inconvénient, en raison de la perte d'énergie que cela représente et à cause de la difficulté du choix d'un manomètre différentiel approprié. Les débitmètres les plus courants ne donneront donc de mesure convenable qu'au-dessus de 15 à 20 % du débit nominal pour lesquels ils sont calculés.

La première conséquence en est la valeur importante du débit unitaire des groupes, donc du débit moyen q_m . Il faudra par conséquent avoir recours à des réservoirs de grande taille pour assurer la régulation dans la zone des faibles débits. On cherchera évidemment à s'affranchir de cette difficulté par divers artifices. Celui qui vient immédiatement à l'esprit consistera à permuter circulairement les ordres d'enclenchement d'un groupe à l'autre pourvu qu'ils soient identiques. Nous avons vu les inconvénients de ce procédé.

On pourra aussi — et ce système est préférable

— couvrir la zone des faibles débits par un ou plusieurs groupes de « caractéristiques » plus faibles, manœuvrés par manostats. C'est le schéma représenté sur la figure 8. Ces groupes seront arrêtés dès que les pompes principales entreront en service; ils pourront être à nouveau mis en route au-delà de la zone de fonctionnement des groupes principaux pour faire face à des pointes exceptionnelles de la demande.

La seconde exigence du procédé débitmétrique a trait à la qualité des débitmètres eux-mêmes. Seuls des appareillages très précis, et souvent très coûteux, pourront être employés de façon satisfaisante. Nous avons eu recours au débitmètre Rittmeyer dans plusieurs installations. Son fonctionnement est irréprochable. Les débitmètres électromagnétiques dont nous avons fait l'essai sont également parfaitement adaptés à ce type de régulation. Malheureusement, le prix de ces appareillages ne permet de les utiliser que pour de grosses installations.

Groupe de secours.

Une particularité du procédé débitmétrique réside dans la nécessité de disposer d'un groupe de secours.

Dans les régulations manométriques ou sur niveaux étagés, si un groupe tombe en panne, la pression baissant, le groupe suivant prend automatiquement la relève. Dans le procédé qui nous occupe maintenant, la panne d'un groupe entraîne une baisse de pression correspondant au débit appelé refoulé par $(n-1)$ groupes. Il se pourra aussi que le réseau réagissant par arrêt des bornes les plus éloignées, le débit baisse lui-même jusqu'à l'arrêt complet de l'installation. Il y a « effondrement » progressif de la cascade débitmétrique.

Il faut donc — et cela est impératif — qu'un groupe en réserve prenne instantanément la place d'un groupe défaillant. Ceci peut se réaliser par un relaiage électrique approprié. On peut aussi commander ce groupe de secours au moyen d'un contact manostatique réglé à l'enclenchement à une pression légèrement inférieure à la pression caractéristique H_0 et, au déclenchement, à une pression légèrement supérieure à la pression maximale de la fourchette.

On notera que cet impératif implique que la station soit équipée de pompes principales identiques.

Critique du système.

Le gros avantage de cette solution réside dans le fonctionnement continu de la station pour tout débit supérieur au débit de déclenchement de la première pompe, ce qui rend l'exploitation très intéressante par la moindre fatigue du matériel.

Le rendement est bon grâce à l'emploi de pompes à « caractéristiques plates ».

Mais les débitmètres employés sont très coûteux, ce qui limite le domaine de cette régulation aux installations relativement importantes.

2. Utilisation de moteurs à vitesse variable.

Nous n'aborderons ce procédé que pour mémoire, aucune réalisation n'ayant suivi l'étude que nous en avons faite.

Disons simplement qu'il paraît *a priori* séduisant d'utiliser des moteurs à vitesse variable pour commander des pompes et ajuster ainsi à chaque instant le débit et la pression de la pompe à la

demande du réseau. Le rendement de l'installation obtenu serait excellent.

Cependant, l'appareillage utilisé pour la réalisation de vitesse variable est compliqué et coûteux; les moteurs eux-mêmes sont coûteux. Le débitmètre reste l'organe de commande le mieux adapté, et le problème du fonctionnement à faible débit n'est pas résolu pour autant.

On notera d'autre part, que l'allure même de la courbe caractéristique des réseaux d'irrigation interdit de tirer vraiment parti du procédé. Il est certain que le procédé est beaucoup mieux adapté à des stations de pompage faites pour travailler sur des courbes quadratiques classiques.

IV. Problèmes particuliers

1. Les types de pompes.

Les grandes variations du niveau de la Garonne et de certaines rivières de la Gascogne nous ont souvent conduits à beaucoup surélever le niveau du plancher des moteurs et de l'appareillage électrique pour les mettre hors d'atteinte en période d'inondation. Il a donc fallu écarter le plus souvent l'emploi de groupes horizontaux en dépit de leur moindre coût et de leur bon rendement.

Il est vrai que les dispositifs d'amorçage automatiques sont par le fait même écartés, ce qui facilite l'exploitation et que le génie civil s'en trouve aussi réduit.

Ce sont les raisons pour lesquelles nous avons préféré les types de groupes suivants qui équipent le plus grand nombre de nos installations :

- groupes horizontaux verticalisés à pompes immergées;
- groupes immergés;
- groupes de forage.

1° Groupes horizontaux verticalisés à pompes immergées.

A titre d'exemple, l'une de nos stations est équipée de groupes de 730 kVA refoulant 500 l/s à une hauteur de refoulement de 105 m. Ce sont les pompes à une volute avec refoulement latéral et ligne d'arbre de 8 m environ placée dans une tubulure indépendante.

La pompe est monocellulaire, immergée. L'arbre de transmission est guidé par des paliers lisses lubrifiés à la graisse sous pression (pompe à graisse entraînée par l'arbre de transmission). Le moteur a un bobinage haute tension 5 kV. L'accouplement pompe-moteur est du type semi-élastique. La butée est à rouleaux obliques.

Ce type de pompe a un rendement excellent; la lubrification à la graisse entraîne des sujétions supplémentaires d'exploitation, mais permet d'éviter une usure rapide des paliers intermédiaires.

Par contre, la disposition adoptée nécessite une accessibilité convenable de l'appareillage immergé. Ceci impose l'exécution d'une bache d'aspiration étanche et sa division en sas indépendants pour le cas où des interventions pour dépannage ou entre-

tien devraient se produire en période de fonctionnement.

Ce type de pompe ne peut donc être adopté que pour les très grosses installations dans lesquelles l'augmentation nécessaire du coût du génie civil est faible par rapport au coût de l'ensemble de l'aménagement.

2° Groupes immergés.

L'installation de ce type de groupe est d'une grande simplicité. Ils n'exigent aucune superstructure coûteuse quel que soit le marnage de la rivière. Seul, le poste électrique doit être installé au-dessus du niveau des plus hautes eaux.

Ces groupes ont cependant un rendement moins bon et ils sont plus coûteux à puissance égale que les groupes classiques. Leur entretien est plus délicat, toute réparation demandant l'intervention d'un personnel très spécialisé et fréquemment la réexpédition du matériel en usine.

Certains groupes ont des bobinages entièrement immergés qui se prêtent mal aux cadences élevées de démarrage. Les efforts électrodynamiques auxquels sont soumises les têtes de bobines, conduisent à une fatigue mécanique de l'isolant. Le contact de l'eau est alors la cause de baisses sensibles du niveau d'isolement.

Il reste à cette solution le gros intérêt de la simplicité de l'équipement, mais ses défauts la font rejeter pour les stations importantes, où on la réservera aux services auxiliaires.

3° Groupes de forage.

Ce sont les plus employés. Leur conception est bien connue, leur gros avantage étant leur système de montage depuis le plancher des moteurs. Ils fonctionnent de façon satisfaisante quel que soit le niveau de la rivière.

Nous noterons à leur sujet l'examen de quelques problèmes particuliers.

Vibrations.

Un groupe bien monté, en principe, ne doit pas vibrer.

Cependant, pour des causes diverses, des vibrations peuvent apparaître qui entraînent une détérioration rapide des roulements et des butées et une usure exagérée des douilles de presse-étoupe.

Parmi ces causes, on notera celles qui proviennent des tassements différentiels du génie civil qui, bien que très faibles, sont souvent inévitables. Ils peuvent occasionner un défaut d'horizontalité des supports de groupes, qui provoque un décalage de l'alignement des arbres. Si l'accouplement moteur-pompe est tant soit peu rigide, les vibrations des pompes vont se transmettre aux moteurs et faire vibrer l'ensemble de la plate-forme. Tous les roulements souffriront, aussi bien ceux des groupes qui tournent que ceux des groupes qui sont à l'arrêt.

Il est donc nécessaire de procéder à un contrôle périodique et au recalage éventuel après quelques mois de service industriel.

Coups de clapet.

La présence de réservoirs hydropneumatiques à proximité des groupes rend très sévères les répercussions des coups de clapet.

Il conviendra de placer une butée entre les colonnes de refoulement des pompes et les clapets, qui reportera sur le génie civil les poussées brusques dues aux coups de clapet.

Dans le but également de réduire l'effet des coups de clapet particulièrement brutaux dans les fortes sections utilisées, nous avons dû abandonner l'emploi des appareils à battants classiques pour utiliser soit des clapets à matelas d'eau limités en ouverture, soit des clapets à membrane caoutchouc, soit des clapets à ressort et obturateurs axiaux, à fonctionnement beaucoup plus souple et silencieux.

Paliers intermédiaires.

Les paliers intermédiaires situés entre la pompe et la butée sont constitués par des bagues métalliques ajustées dans des coussinets en caoutchouc synthétique (olivite, hydrolub, etc.).

Ils sont lubrifiés par l'eau de refoulement, souvent très chargée en matières colloïdales en suspension et en sable. Il s'ensuit une usure importante des douilles lorsque le métal adopté n'a pas une dureté suffisante.

Plusieurs solutions sont actuellement à l'étude pour pallier ces inconvénients :

- utilisation de douille en acier inoxydable 18/8 stellité (les essais entrepris donnent des résultats prometteurs);
- lubrification des paliers à la graisse dans un fourreau d'arbre (solution relativement onéreuse et compliquée qui ne peut s'envisager que pour de très grosses unités).

2. La filtration.

L'eau d'irrigation devra la plupart du temps être grossièrement filtrée pour éviter l'encrassement de l'appareillage (buses, compteurs des bornes, etc.).

Les différents filtres que nous avons utilisés sont des type suivants :

- filtration au refoulement :
 - crépines rotatives à lavage automatique,
 - crépines fixes à lavage manuel;
- filtration à l'aspiration :
 - crépines rotatives à racleurs,
 - grilles rotatives à lavage automatique.

1° Crépines rotatives à lavage automatique.

Le principe de ces crépines est représenté sur la figure 10.

Un cône rotatif filtrant est placé sur le circuit de refoulement de la station. Deux regards diamétralement opposés sont en liaison avec la tuyauterie extérieure destinée au lavage à contre courant. Un détecteur de pertes de charge met en route le moteur d'entraînement du filtre et l'électrovanne de lavage.

L'intérêt de ce type de filtration réside dans l'économie de génie civil qu'il permet : il peut être posé sur un simple socle en béton à la sortie de la station. Mais il a l'inconvénient de nécessiter de gros débits de lavage (environ 10 % du débit nominal de l'installation) et d'entraîner des pertes de charge importantes (souvent supérieures à 1 bar).

10/

11/

2° Crépines fixes à lavage manuel.

Ce type de crépine est identique au précédent. Son principe est représenté sur la figure 11. Son lavage se fait manuellement à contre-courant par ouverture de la vanne de vidange. Périodiquement, on doit le démonter pour un nettoyage complet. Il n'est utilisable que pour les très petites stations.

3° Crépines à racleurs (voir fig. 12).

Un racleur entraîné par un groupe motoréducteur tourne en permanence dès qu'une pompe est en service. Les déchets tombent au fond du puits d'où ils sont retirés périodiquement avec une pompe à boue.

La mauvaise lubrification des parties mobiles

12/

13/

10/ Filtre à panier rotatif sur le refoulement.
Rotary-drum delivery filter.

11/ Filtre à panier fixe sur le refoulement.
Fixed-drum delivery filter.

12/ Crépine rotative à racleurs sur l'aspiration.
Rotary scraper intake filter.

13/ Clapet de fond de cuve Jeumont-Vögel.
Jeumont-Vögel tank bottom valve.

immergées nous a conduits à employer des coussinets en téflon.

L'avantage de cette filtration est son extrême simplicité et son faible coût. Son inconvénient majeur réside dans l'obligation de curer périodiquement l'avant-puits.

Cette solution est cependant intéressante jusqu'à des débits de 200 à 300 l/s.

4° Filtration à chaîne.

Ce système est dérivé de la filtration à tambour, qui serait inutilisable en raison des importants marges de nos rivières. Il est composé d'une succession de panneaux filtrants rectangulaires disposés le long d'une chaîne mobile dont la rotation est

provoquée automatiquement dès que la perte de charge du filtre est supérieure à un seuil donné. Une électrovanne assure alors l'alimentation d'une rampe de lavage dont les jets décollent les déchets qui ont été retenus par les panneaux filtrants. Ces déchets sont évacués avec l'eau de lavage par une goulotte appropriée.

Ce procédé est très efficace; la consommation en eau est très faible.

Ces appareils sont cependant exposés à une corrosion très active. Il est difficile de trouver les peintures efficaces qui résistent aux frottements et aux immersions alternées. L'emploi d'aciers inoxydables paraît le seul remède satisfaisant.

Les galets de roulement de chaîne seront en matière plastique afin d'éviter les graissages périodiques longs et coûteux.

Le prix élevé de ces appareils et leur incidence sur le coût du génie civil les destinent aux plus grosses installations de pompage.

3. Réservoirs hydropneumatiques.

Les problèmes que posent les cuves à air comprimé elles-mêmes sont essentiellement des problèmes de corrosion intérieure. Le contact alterné du métal avec l'air et l'eau lui est extrêmement néfaste.

Il semble qu'à l'heure actuelle, ce soient les résines épikotes qui donnent la meilleure protection. Encore faut-il qu'elles soient mises en œuvre sur un métal correctement préparé. La rilsanisation, certainement excellente, est encore trop onéreuse pour qu'elle puisse être utilisée de façon habituelle.

S'agissant de leur fonctionnement, les réservoirs à air comprimé posent un problème particulier en cas d'arrêt brutal de la station par coupure de l'alimentation électrique, par exemple. On se rappellera en effet que les stations ne sont équipées que de petits compresseurs destinés aux appoints d'air. Il est donc nécessaire d'éviter la perte de l'air comprimé après l'arrêt de l'installation. Dans cette hypothèse, il faut impérativement isoler le réservoir du reste de la station, ce qui se réalise par la mise en place de clapets de fond de cuve étanches.

1° Clapet à flotteur Jeumont-Vögel (fig. 13).

Le flotteur entraîne un piston qui obture l'entrée du réservoir en partie basse. Le piston coulisse dans un cylindre percé, dans lequel il bute en position haute, laissant libre passage à l'eau. Le percage du cylindre, créant un effet de dash-pot, amortit les mouvements rapides consécutifs à une variation brusque des conditions débit-pression. Le système contribue donc à amortir les coups de béliet éventuels.

Il semble que la taille et le poids des flotteurs doivent être augmentés pour un meilleur fonctionnement en eau chargée, les risques de grippage étant importants. Le système a l'avantage de la simplicité et il est peu coûteux.

2° Clapet à flotteur Sulzer (fig. 14).

Son principe de fonctionnement est très voisin du précédent. Mais, étudié pour fonctionner sans défaillance en eau chargée, il coûte notablement plus cher.

3° Clapet à vérin (fig. 15).

Lorsque le niveau de l'eau descend en dessous de la cote d'alerte, une électrovanne envoie de l'air comprimé à la partie supérieure du vérin qui ferme le clapet. A la remise en service, il faut évidemment que la station obéisse dans son ensemble à un automatisme particulier dont nous avons parlé au chapitre 2.

Ce dispositif fonctionne correctement en eau chargée; il nécessite une fabrication très soignée. Son exécution en acier inoxydable le rend relativement onéreux.

Si ce système laisse jouer convenablement le réservoir en anti-bélier au moment de l'arrêt des groupes, lui permettant bien de limiter la dépression, en contrepartie, il ne laisse aucune possibilité au retour de l'onde. En pareil cas, il faudra impérativement munir la station d'une soupape de décharge pour écrêter rapidement l'onde de surpression.

4. Vannes motorisées.

Les coupures du réseau E.D.F. ont des conséquences souvent néfastes sur le fonctionnement des installations.

Les coupures courtes, d'une durée de 3/10^{es} de seconde, n'ont d'effet que sur l'appareillage électrique. Il s'agira simplement d'éviter une fatigue inutile des résistances de démarrage des groupes. Jusqu'à une demi-seconde après les coupures, les groupes seront redémarrés en direct en maintenant pendant cette durée l'auto-alimentation des contacteurs de court-circuitage des résistances de démarrage.

14/ Clapet de fond de cuve Sulzer.

Sulzer tank bottom valve.

15/ Clapet de fond de cuve Bréguet KSB.

Bréguet KSB tank bottom valve.

Les coupures d'une durée supérieure ont des répercussions sur le fonctionnement hydraulique. Les bornes du réseau d'irrigation restant ouvertes, la pression baisse rapidement au fur et à mesure que le réseau se vide. Il se produira aussi de nombreuses entrées d'air par l'appareillage de purge automatique.

À la réapparition du courant, la régulation donnera à la station les ordres successifs de démarrage pour atteindre très vite le régime de fonctionnement à débit maximal. On conçoit aisément les risques de rupture que court alors le réseau partiellement vidé.

C'est la raison pour laquelle nous avons normalisé l'emploi de vannes automatiques qui isolent les remises en route. On pourra, par exemple, procéder au remplissage progressif en temporisant l'ouverture de la vanne par paliers successifs. Ce système nécessite un appareillage complexe et une horlogerie coûteuse, mais il présente surtout l'inconvénient de rester « indifférent » à la durée de la coupure et à l'importance de la chute de pression du réseau.

Nous lui préférons le processus suivant que nous avons mis au point dans plusieurs stations.

Au retour du courant, si la pression du réseau est supérieure à une valeur H_1 voisine de la pression caractéristique H_0 , la vanne s'ouvre complètement et la station redémarre normalement.

Si la pression du réseau est inférieure à H_1 et supérieure à une pression H_2 de l'ordre de 4 à 5 bars, la vanne s'ouvre partiellement pour permettre l'écoulement d'un débit Q_1 relativement important. Dès que $H = H_1$, la vanne s'ouvre complètement et la station redémarre normalement.

Si la pression est tombée à une valeur très basse, la vanne s'ouvrira pour marquer deux paliers jusqu'à remontée successive de la pression aux valeurs de réglage H_2 et H_1 .

5. Problème de l'eau brute.

Enfin, un problème particulier aux stations de pompage d'irrigation mérite d'être souligné, c'est celui de l'eau brute.

Indépendamment des différents effets de l'eau brute sur le matériel dont nous avons parlé plus haut, on notera les points suivants.

1° Entartrage des roues.

Les roues, au bout de six à huit mois de séjour dans l'eau en période hivernale, se recouvrent d'une couche de tartre d'épaisseur variable qui augmente leur rugosité et diminue le rendement des groupes.

Périodiquement, il faudra les repolir à l'occasion des visites d'entretien, tous les trois ou quatre ans au plus.

2° Envasement des bâches.

Les eaux chargées provoquent un envasement assez actif des puits et bâches d'aspiration dont le curage est souvent délicat et coûteux si des dispositifs spéciaux n'ont pas été mis en place dès l'origine.

3° Corrosion de l'appareillage.

Nous en avons parlé à propos des filtres, mais tout l'appareillage métallique au contact de l'eau brute est soumis à une corrosion plus ou moins importante et plus ou moins rapide suivant les lieux. Une protection très soignée est nécessaire, à défaut du choix d'un appareillage moins sensible, mais plus coûteux.

4° Circuits hydrauliques et appareillages auxiliaires.

Les circuits hydrauliques auxiliaires, électrovannes, clapets, petite tuyauterie, détecteurs de niveaux, débitmètres, etc. doivent être pourvus de filtres individuels efficaces dont les fréquents nettoyages conditionnent la marche convenable des installations. Si ces circuits sont nombreux, les charges d'exploitation peuvent peser exagérément sur la gestion de ces ouvrages.

Conclusion

L'expérience que nous avons acquise de la mise au point, de l'exploitation et de l'entretien d'une vingtaine de stations de pompage automatiques nous permet de penser que les systèmes d'équipement et de régulation ont tous des qualités propres intéressantes. Chaque cas particulier nécessitera un examen approfondi et une comparaison objective des différentes solutions qui se présentent.

Le choix sera influencé par la recherche du meilleur rendement. Mais si cette acquisition se traduit par une complication exagérée des automatismes électriques ou des circuits auxiliaires, souvent génératrice d'une augmentation importante du coût de l'installation, on préférera un système moins satisfaisant, peut-être, mais de fonctionnement plus sûr et d'entretien moins délicat.

Les meilleurs systèmes sont certainement ceux qui mettent en œuvre l'appareillage le plus simple et le moins sensible aux dérèglages, aux effets de l'eau brute, aux variations de la tension, entre autres. Certains peuvent allier ces avantages à des qualités propres de conception qui permettent d'atteindre le but recherché en priorité qui est l'élévation du rendement de l'installation.

Dans le cadre restreint de notre propos, nous n'avons pas abordé certains aspects particuliers des équipements des stations de pompage pour l'irrigation. Toutes comportent de nombreuses protections dont il faudrait parler à propos de chacune d'elles.

On notera pour finir que le champ d'expérience ouvert par ces installations est loin d'être totalement exploré. De nouveaux systèmes seront mis à l'épreuve, de nouveaux appareillages essayés. Il est un domaine en particulier dont tout le parti souhaitable n'est pas encore tiré, c'est celui de la transistorisation des automatismes. Elle apportera à n'en pas douter, de grosses simplifications, une plus grande sûreté de fonctionnement et un allègement des frais d'entretien et d'exploitation.

Présentation et discussion

Président : M. BERGERON

Présentation

par M. MOREL, *Directeur des Services Techniques de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne* :

Monsieur le Président, Messieurs,

Je ne veux retenir votre attention que pendant très peu de temps pour vous rappeler le sens et la raison des études et des communications que vous a faites hier soir et que va vous faire tout à l'heure la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, hier par la bouche de M. BOURLA, tout à l'heure par celle de M. VERDIER.

Comme on l'a dit hier, la Compagnie évolue dans une région qui est une sorte de frontière entre la zone des irrigations du type méditerranéen et celle des irrigations dites de complément. Et si je devais définir le périmètre dans lequel nous travaillons, d'un seul mot, je choisirais celui d'irrégularité : irrégularité dans le climat, irrégularité dans le relief, dans la nature des sols et je dirais même dans le comportement des hommes. C'est cette irrégularité qui nous pose des problèmes difficiles en matière de prévision et difficiles en matière d'application de systèmes de calcul ou de méthodes de détermination des caractéristiques des ouvrages.

Hier, vous avez compris, dans la communication de M. BOURLA, comment, du fait de l'irrégularité du climat, les surfaces irriguées étant différentes des surfaces équipées, on devait procéder à un aménagement des formules mises au point par M. CLÉMENT, et vous avez saisi, tout au long de son exposé, que des contraintes supplémentaires se posaient à nous qui, finalement, faisaient que, lorsque les surfaces irriguées ne sont pas égales aux surfaces équipées, toutes choses égales d'ailleurs, et indépendamment même du fait que les consommations unitaires par hectare sont plus faibles, le coût d'un réseau d'irrigation est plus élevé que dans des régions où les surfaces irriguées atteignent sensiblement les surfaces équipées.

C'est pourquoi M. BOURLA a enchaîné en nous exposant le coût des différentes modifications que l'on peut apporter dans le luxe et dans le comportement d'un réseau.

Je pense que c'est là un des facteurs essentiels auxquels nous nous trouvons confrontés, et, pour reprendre une expression devenue célèbre, je « souhaite beaucoup de plaisir » à ceux qui feront vraiment de l'irrigation de complément, parce qu'un réseau collectif dans ces secteurs posera des problèmes de fonctionnement et de prix de revient éminemment difficiles.

Et maintenant je vais céder ma place à M. VERDIER en vous disant que, là aussi, en matière de stations de pompage, si nous nous sommes penchés abondamment sur ce problème, c'est parce que nous avons affaire à un périmètre qui s'équipe par petites fractions, en choisissant les secteurs où l'on doit faire évoluer l'agriculture vers une forme intensive, comme le disait hier M. JANET, en laissant d'autres secteurs évoluer vers des formes extensives, que, de ce fait, nous avons une mosaïque de réseaux à équiper, dispersés sur un périmètre de l'ordre de 7 à 800 000 ha et que le problème du fonctionnement, de la gestion économique et du coût d'un nombre de stations de pompage qui atteint déjà 25 ou 30 posait pour nous des problèmes capitaux. Nous étions là de nouveau confrontés au problème de rechercher le minimum de dépenses pour la Compagnie et, partant, pour l'économie nationale, en tenant compte à la fois de l'investissement et du fonctionnement, et c'est tout le problème de la régulation et de l'entretien.

Je voulais, par ces simples mots, vous montrer pourquoi nous avons abordé, hier soir, et pourquoi nous abordons ce matin ces deux problèmes.

Je demande donc à M. VERDIER d'entamer son exposé beaucoup plus technique que je ne saurais le faire moi-même. (*Applaudissements.*)

Discussion

M. le Président regrette d'avoir été obligé, par les exigences de l'horaire, d'interrompre l'exposé si intéressant de M. VERDIER. Il félicite les auteurs sur leur rapport où l'on

trouve, bien ordonnées et classées, les différentes solutions possibles pour la régulation des stations de pompage; la grande expérience personnelle des auteurs leur permet de formuler avec compétence les avantages et les inconvénients de chacune d'elles.

En un mot, il s'agit d'un travail très complet auquel tous ceux qui s'intéressent à la question seront appelés à se reporter.

M. de BOISSEZON (SO.GR.E.A.H., Pau) présente les remarques ci-après :

La régulation Jeumont était conçue à l'origine pour adapter la plage de fonctionnement des pompes à une caractéristique quadratique du réseau et, par suite, obtenir un meilleur rendement.

Depuis peu d'années, la notion de l'horizontalité de la caractéristique du réseau a été révélée et les constructeurs ont rapidement proposé les systèmes indiqués par M. VERDIER et qui s'adaptent à une caractéristique horizontale.

En fait, c'est la caractéristique maximale qui est horizontale. L'examen fréquentiel des courbes caractéristiques de réseaux a fait l'objet de peu de travaux à ce jour.

La caractéristique dont la présentation est 9/10^{es}, par exemple, n'est certainement pas horizontale et il suffirait de la considérer pour la définition de la régulation Jeumont, par exemple.

La caractéristique minimale doit être considérée notamment dans le cas de la régulation à surface libre avec réservoir d'extrémité. Cette caractéristique est, en effet, descendante et le fonctionnement hydraulique ou électrique peut en souffrir.

Le rendement global de la station doit tenir compte de la caractéristique médiane et non de la caractéristique maximale en considérant aussi la fréquence d'apparition des différents débits.

Le rendement global de la station doit enfin être étudié en tenant compte des conditions locales d'irrigation et notamment de la consommation. Dans les conditions du Sud-Ouest, le coût de l'énergie varie de 20 à 50 F/ha.an pour 1 000 à 2 000 m³/ha.an, ce qui est peu par rapport aux charges d'irrigation qui varient de 300 à 500 F/ha.an.

M. VERDIER regrette de n'avoir pu parler de l'aspect économique de la question, faute de temps, mais cet aspect est évoqué dans son mémoire.

M. PORCHERON signale que le système Jeumont présente un léger inconvénient dû non au relais, mais à des ballons relativement faibles qui fonctionnent par excès d'air : il y a une tranche d'eau minimale en bas. Le constructeur a essayé de remédier à cet inconvénient en installant, la plupart du temps à la partie inférieure, une soupape de sécurité, qui se ferme en cas d'excès d'air intempestif. Or, dans une des stations de la Société du Canal de Provence, les relais ont toujours bien fonctionné, mais cette soupape n'a jamais marché et les groupes ont souffert.

M. PORCHERON souhaite que la partie hydraulique des systèmes de régulation soit aussi au point que la partie électrique.

M. VERDIER en convient et signale qu'il a mentionné cet inconvénient dans son mémoire. Dans les stations automatiques, il faut se prémunir contre un certain nombre de risques, et celui que M. PORCHERON a signalé en est un : il faut éviter que l'air comprimé s'échappe dans le réseau et, pour cela, on place des « clapets de fond de cuve » dont il existe plusieurs types, les uns économiques, les autres mécaniquement mieux construits.

M. BONNAL (SOMIVAC, Bastia) signale qu'il a eu connaissance d'un projet de régulation purement électrique qui ne s'intéressait ni au débit, ni à la pression, mais qui détectait seulement la puissance absorbée par la dernière pompe mise en route. Si le débit de la station devient insuffisant par rapport au débit appelé, la puissance absorbée augmente, ce qui permet d'enclencher un nouveau groupe. M. BONNAL demande aux conférenciers s'ils ont eu connaissance d'une application pratique d'un tel système.

M. VERDIER répond qu'il n'en a pas eu connaissance.

M. BONNIN rappelle que M. VERDIER a montré que le rendement global de l'installation était souvent très diminué par la régulation.

Ne peut-on pas dans ce cas envisager une régulation par court-circuit hydraulique (ou by-pass) très simple et utilisant toujours les pompes à leur rendement maximal ? Une telle régulation a-t-elle été étudiée ou même utilisée ?

M. VERDIER connaît des installations qui fonctionnent sur ce principe, mais pas dans sa Compagnie. Il ne peut donc répondre d'une façon précise, mais il estime que ce système doit faire l'objet d'un examen attentif sur le plan du bilan énergétique en cours de fonctionnement, en raison des pertes d'eau qu'il entraîne.

M. BLANC (SOMIVAC, Bastia) rappelle que certain système mentionné par M. VERDIER présente des inconvénients liés

aux difficultés de contrôle de la pression aux niveaux donnés d'enclenchement et de déclenchement des groupes. Ne peut-on pas pallier cela en utilisant la pression et non le niveau pour la régulation ?

M. VERDIER estime qu'une détection de pression et une détection de niveau reviennent pratiquement au même : le matériel existant sur le marché est peut-être plus élaboré pour une mesure de pression que pour une mesure de niveau, mais, par contre, celle-ci est souvent plus facilement précise qu'une mesure de pression.

M. le Président prie à nouveau M. VERDIER de l'excuser d'avoir dû interrompre son exposé et conseille vivement les auditeurs de prendre connaissance de tous les points de cet intéressant mémoire qui n'ont pu être présentés au cours de cette réunion.