ÉVALUATION DES DÉBITS DANS LES RÉSEAUX D'IRRIGATION

PAR F. R. BOURLA *

Introduction

L'introduction, puis la généralisation en France depuis une dizaine d'années, des réseaux collectifs d'irrigation par aspersion, ont conduit les auteurs de projets et les maîtres d'ouvrages responsables de ces aménagements à définir et mettre au point des méthodes de calcul applicables à ces réseaux, et notamment, au problème de l'évaluation des débits.

Il convient de souligner que ce problème s'est essentiellement posé à propos de la définition de réseaux fonctionnant « à la demande », terme devenu courant mais qu'il conviendrait peut-être de mieux définir, ou plus exactement à propos du champ de variations beaucoup plus grand de la « liberté » de la distribution, rendu possible par l'écoulement sous pression, par opposition avec la « rotation » ou « tour d'arrosage » habituel en irrigation traditionnelle.

Dès 1955, M. René Clément, alors ingénieur au Service spécial de la Basse-Durance, proposait une formule de calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande, formule basée sur le calcul des probabilités et appelée modestement par l'auteur formule de la demande, bien que beaucoup plus connue dans les milieux techniques sous le nom de formule de Clément, et qui est le bréviaire du calcul des réseaux d'irrigation.

Cependant, la construction de réseaux d'irrigation dans des régions et sous des climats où l'irrigation

est qualifiée de « complémentaire », par opposition avec les zones où elle est pratiquée de manière totale, a conduit à des essais d'affinage des méthodes de calcul, pour tenir compte d'une manière plus précise des contraintes économiques.

Il conviendrait d'ailleurs de s'arrêter quelque peu à cette opposition entre irrigation totale et irrigation de complément.

Dans le premier cas, il s'agit de périmètres placés sous des climats tels que le déficit pluviométrique est, de loin, le principal facteur limitant l'intensification agricole, et où on pourrait dire, à la limite, que c'est l'irrigation ou rien. Il est donc logique de considérer qu'un réseau d'irrigation implanté dans ces conditions soit calculé pour desservir la quasi-totalité de la surface.

Dans le second cas, lorsque l'on envisage la desserte de zones où l'irrigation est dite « de complément », il ne s'agit pas à proprement parler, comme on pourrait le croire, d'apporter un simple complément de pluviométrie, déficitaire à certaines périodes, à un système de cultures traditionnelles en culture sèche. Mais le climat est tel, que le déficit hydrique n'étant pas le principal facteur limitant, l'intensification par l'irrigation, qui demeure certes un levier puissant, ne peut s'envisager de par des contraintes techniques, humaines et économiques, que corrélativement à des systèmes de production en sec avec un équilibre qu'il convient d'apprécier dans chaque cas. Tel est le cas, notamment, du périmètre concédé à la Compagnie d'Aménagement des Côteaux de Gascogne dans le sud-ouest de la France.

Nous nous proposons, dans l'exposé qui va suivre, de passer en revue les différents aspects de l'évaluation des débits dans les réseaux d'irrigation,

* Ingénieur civil du Génie rural, Chef de la Division de l'Équipement à la Compagnie d'Aménagement des Côteaux de Gascogne.

en insistant surtout sur les conséquences économiques de tel ou tel choix; en effet, de plus en plus, le projeteur ou « l'aménagiste » qui étudie un réseau doit se préoccuper de l'adaptation la meilleure possible de l'outil qu'il conçoit au problème posé, sous l'angle technique comme sous l'angle économique, au terme d'une évolution « optimale » du périmètre qu'il est souvent difficile de prévoir lors de l'action d'aménagement.

Définitions et notations

Il apparaît nécessaire, avant d'aborder tout raisonnement, de définir les paramètres et notations employés.

Unité de débit :

Il y a souvent controverse entre l'utilisation de l'unité mètre cube/heure et l'unité litre/seconde. La première, d'usage très commode au niveau de la parcelle, est également traditionnellement employée par les fabricants de matériel de pompage; la seconde, offre l'avantage indéniable d'être plus représentative à l'esprit, surtout pour les débits importants. Nous avons, quant à nous, adopté systématiquement le litre/seconde.

Besoins en eau annuels de l'hectare moyen irrigué ($M \text{ m}^3/\text{ha}$) :

Cette grandeur est citée pour mémoire, car elle n'intervient qu'assez peu au niveau des réseaux de distribution qui sont toujours calculés pour une période de pointe. Cependant, elle intervient au niveau des grands ouvrages (stockages, bassins de régulation, ouvrages de transfert), ainsi que sa distribution mensuelle. Elle résulte généralement de l'application des formules de besoins en eau les mieux adaptées, à un assolement-type ou à un assolement défavorable sur le plan des besoins en eau.

Besoins en eau de l'hectare moyen irrigué pendant la période de pointe ($E \text{ m}^3/\text{ha}$) :

Les réseaux d'irrigation sont généralement calculés pour desservir les besoins en eau du mois de pointe, en principe juillet. Là aussi, il s'agit des besoins de l'hectare moyen irrigué, c'est-à-dire que l'on fait intervenir une certaine compensation entre les besoins de plantes plus ou moins exigeantes par le jeu d'un assolement-type.

Il est également à faire remarquer que, à la suite des essais systématiques entrepris concernant une meilleure connaissance des besoins en eau des différentes plantes, il apparaît parfois que la période de pointe réelle n'est pas le mois, mais souvent la décade.

Débit fictif continu de pointe ($f \text{ l/s.ha}$) :

C'est le débit continu qui fournit, pendant la période de point T le volume E; si E correspond au moins de pointe, on a :

$$f \text{ l/s.ha} = \frac{E \text{ m}^3/\text{ha}}{2592}$$

Surface équipée ($S_e \text{ ha}$) :

C'est la surface, desservie par un réseau d'irrigation, pouvant, dans des conditions techniques cor-

rectes (longueur d'approche, pression) être irriguée à un moment ou à un autre. Elle est généralement voisine de la surface agricole utile.

Surface irriguée ($S_i \text{ ha}$) :

C'est la surface, non localisée, devant être effectivement irriguée une année déterminée, ou mieux, pendant la période de pointe d'une année déterminée.

Rapport d'irrigation ou « densité » d'irrigation :

C'est le rapport :

$$\frac{S_i}{S_e} = \frac{\text{surface irriguée}}{\text{surface équipée}}$$

On désigne par :

- θ : la valeur variable de ce rapport;
- m : la valeur d'équilibre définie sur le plan agronomique pour un ensemble suffisamment grand.

Rendement du réseau (r_r) :

$$r_r = \frac{T_r}{T} = \frac{\text{période réelle d'utilisation du réseau}}{\text{période de pointe}}$$

C'est un rendement « en temps » d'utilisation du réseau.

Débit d'une prise ou « main d'eau » ($d \text{ l/s}$) :

Il est à noter la distinction entre prise et borne, dans certains cas, les prises pouvant être groupées jusqu'au nombre de quatre sur une même borne.

Surface de l'ilot élémentaire d'irrigation ($s \text{ ha}$).

Rendement de la prise (r_p) :

C'est la surface irriguée par la main d'eau pendant la période de pointe T, compte tenu des temps morts au niveau de la parcelle (déplacements du matériel, temps de ressuyage ou chômage dû à la liberté de la distribution).

Elle est liée au débit de la prise par la relation :

$$s = \frac{d}{f} \cdot r_p$$

r_p étant le rendement en temps de la prise.

Nombre de prises d'un réseau ou d'une partie de réseau (R);

D débit continu du réseau pendant la période T;

D' débit continu du réseau pendant la période T';

Q débit de pointe.

Exposé des différents procédés concourant au calcul des débits

Bien que, logiquement, il conviendrait d'examiner en premier lieu le problème de la connaissance et de la définition des surfaces à irriguer par un réseau, nous préférons, pour la commodité de l'exposé, aborder tout d'abord le raisonnement qui conduit à l'établissement de la formule de la demande (première formule).

1. Première formule de la demande.

Le débit de pointe d'un réseau, ou en un point du réseau, est nécessairement compris entre les deux valeurs suivantes, selon les notations adoptées :

$$D' < Q < Rd$$

ou :

$$\frac{D}{r_r} < Q < Rd$$

L'hypothèse de base consiste à supposer que chaque prise du réseau fonctionne selon un processus aléatoire, dont la probabilité élémentaire, ou fréquence de fonctionnement, est définie de la manière suivante :

$$p = \frac{t'}{T'} = \frac{\text{temps de fonctionnement moyen de chaque prise}}{\text{période de pointe réelle}}$$

le volume d'eau que doit fournir chaque prise pendant la période T' est $D'T'/R$;
et par suite, le temps moyen de fonctionnement d'une prise est $t' = (D'T'/Rd)$;
d'où :

$$p = \frac{t'}{T'} = \frac{D'}{Rd} = \frac{D}{r_r Rd}$$

$$p = \frac{D}{r_r Rd} = \frac{fS_i}{r_r Rd} \quad (1)$$

Si l'on considère la population des R prises, la probabilité, pour que sur ces R prises il y ait i prises et i seulement en fonctionnement simultané, s'écrit :

$$C_R^i p^i q^{R-i}$$

q désignant en l'occurrence la probabilité inverse

$$q = 1 - p$$

La probabilité totale pour que sur R prises il y en ait au plus N en fonctionnement simultané ($N < R$), s'écrit (loi binomiale) :

$$P_q = \sum_{i=0}^{i=N} C_R^i p^i q^{R-i} \quad (2)$$

la probabilité P_q est appelée qualité de fonctionnement du réseau;

la grandeur $1 - P_q$ est la probabilité de perte, ou l'encombrement du réseau.

Si l'on se fixe une qualité de fonctionnement à satisfaire par le réseau, comprise entre 0 et 1 (pratiquement 95 ou 99 %), on peut calculer par la relation (2), le nombre N de prises ouvertes simultanément qui correspond à cette qualité. Le débit de pointe du réseau sera, par suite :

$$Q = Nd$$

Cependant, le calcul des coefficients C_R^i , même en utilisant des expressions approchées (formule de Stirling, devient rapidement pénible lorsque R augmente.

Or on démontre, en calcul des probabilités, que

la loi binomiale tend, pour R assez grand, vers une loi réduite, ou loi de Laplace-Gauss.

La variable réduite est définie par l'expression suivante :

$$\frac{X - Rp}{\sqrt{Rpq}}$$

et l'on peut écrire :

$$Pr\left(\frac{X - Rp}{\sqrt{Rpq}} \leq U\right) = \Pi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-(U^2/2)} dU$$

La fonction $\Pi(U)$ étant tabulée, si l'on choisit la valeur de U correspondant à P_q définie par la relation :

$$P_q = \Pi(U_{P_q})$$

la variable X prend la valeur N recherchée, qui s'écrit :

$$N = Rp + U(P_q) \sqrt{Rpq}$$

et le débit de pointe :

$$Q = Nd = d [Rp + U(P_q) \sqrt{Rpq}] \quad (3)$$

Pratiquement, on utilise les deux valeurs suivantes :

$P_q = 95 \%$	$U_{95\%} = 1,645$
$P_q = 99 \%$	$U_{99\%} = 2,324$

En fait, la formule dépend de deux paramètres dont la discussion sera effectuée plus bas.

2. Problème de la détermination de la surface irriguée en un point du réseau. Variation du rapport S_i/S_e .

a) Position du problème théorique.

Nous avons déjà dit que, dans certains périmètres, l'intensification par l'irrigation ne pouvait s'envisager que par une évolution vers un certain équilibre, en polyculture, des cultures sèches et des cultures irrigables, équilibre dans lequel ces dernières, de par diverses contraintes, peuvent n'être pas toutes effectivement irriguées.

Un certain nombre de goulots d'étranglement peut en effet contrarier une extension des surfaces irriguées; ce sont : la main-d'œuvre nécessaire à l'irrigation proprement dite, le niveau technique des agriculteurs, les capitaux nécessaires aux investissements parallèles de l'irrigation, et qui sont nécessaires pour rentabiliser cette dernière.

Il s'agit, en fait, d'évaluer les surfaces effectivement irriguées, telles qu'elles le seront au terme d'une évolution vers une intensification qu'on pourrait qualifier d'optimale, c'est-à-dire celle qui réalisera économiquement les potentialités agricoles naturelles, foncières et humaines du périmètre.

Les études préliminaires permettent d'apprécier, au moins qualitativement pour l'instant, les potentialités relatives de différents ensembles d'un périmètre (sous-secteurs), et par suite, de classer ces derniers en leur appliquant une valeur optimale du rapport d'irrigation $m = (S_i/S_e)$.

Mais les valeurs ainsi définies ne sont applicables qu'à des surfaces équipées relativement importan-

tes, à l'intérieur desquelles des compensations suffisamment nombreuses sont susceptibles d'intervenir dans la répartition des parcelles engagées à l'irrigation. Au fur et à mesure que l'on considère des surfaces équipées de plus en plus petites, la valeur du rapport S_i/S_e peut devenir tout à fait différente et, à la limite, pour une surface S_0 représentant la plus grande concentration des parcelles irriguées, ce rapport peut être égal à l'unité.

On est donc conduit à rechercher une loi de variation de θ entre la valeur 1 atteinte pour la concentration maximale S_0 et la valeur m , obtenue pour S_e suffisamment grand, par exemple pour $S_e > S_1$. Primitivement, il avait été envisagé une loi de variation linéaire entre S_0 et S_1 ; mais il est apparu, à la suite d'observations sur des périmètres en fonctionnement, qu'en réalité, la courbe avait une concavité tournée vers le haut.

Sur le plan théorique, une loi de variation pouvait être recherchée, en schématisant le problème par un certain nombre d'hypothèses, et notamment, en supposant cette variation liée à la répartition des surfaces irriguées à l'intérieur des surfaces équipées selon un processus aléatoire, en suivant un raisonnement analogue à celui utilisé pour l'établissement de la formule de la demande.

Considérons une certaine surface S_e et une décomposition de cette surface en n éléments identiques de surface unitaire σ :

$$S_e = n\sigma$$

La surface unitaire σ est telle qu'un élément ayant cette surface est entièrement irrigué ou non.

L'obtention d'une loi de variation du rapport θ peut découler d'une hypothèse faite sur la répartition des éléments de surface σ irrigués par rapport à la totalité des éléments de surface σ considérés.

En effet, si :

n : est le nombre d'éléments considérés;
 x : le nombre d'éléments irrigués parmi les n ;
 le rapport θ a pour valeur :

$$\theta = (x/n)$$

Cette hypothèse de répartition peut être la loi du hasard, représentée par la fonction de Gauss.

b) Expression mathématique de la relation

$$\theta = f(S_e).$$

Considérons la surface par laquelle a été défini le rapport S_i/S_e final m (secteur ou sous-secteur), et la totalité N des éléments de surface élémentaire σ qui la composent.

Par définition, la probabilité élémentaire d'irrigation d'un élément est :

$$p = \frac{\text{surface irriguée totale}}{\text{surface équipée totale}} = m$$

Considérons des surfaces équipées inférieures à la surface précédente, définies par le nombre n d'éléments considérés :

$$0 < n < N$$

A chaque valeur de n correspond une valeur x d'éléments irrigués parmi les n .

Ecrivons que la probabilité pour que x éléments au plus pris parmi les n soient irrigués, à une valeur donnée (0,95 par exemple), la répartition se faisant suivant une loi de Gauss de probabilité élémentaire m .

Cette probabilité totale s'écrit :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-U^2/2} dU = \Pi(U)$$

avec :

$$U = \frac{x - nm}{\sqrt{nm(1-m)}}$$

La fonction de Gauss donne pour $P = 0,95$ une valeur de $U = 1,645$, d'où la relation :

$$1,645 = \frac{x - nm}{\sqrt{nm(1-m)}}$$

ou :

$$x = nm + 1,645 \sqrt{nm(1-m)}$$

La valeur du rapport $\theta = (x/n)$ s'en déduit immédiatement :

$$\theta = m + \frac{1,645 \sqrt{m(1-m)}}{\sqrt{n}}$$

Cette relation est universelle et ne dépend que de m ; on peut donc tracer une fois pour toutes la famille des courbes attachées à chaque valeur de m ; cette famille de courbes est donnée sur le graphique annexé.

A partir de cette relation universelle, la courbe applicable à chaque secteur ou sous-secteur est déduite par le changement d'unité des abscisses :

$$S_e = n \cdot \sigma$$

d'où la relation :

$$\theta = m + \frac{1,645 \sqrt{m\sigma(1-m)}}{\sqrt{S_e}} \quad (4)$$

La relation ainsi définie montre une variation du rapport θ asymptote à la valeur m prise comme hypothèse pour une surface équipée relativement importante.

Pour des réseaux desservant des surfaces équipées de faible ou moyenne importance, cas fréquent dans les structures de réseaux juxtaposés résultant d'un fractionnement économique, la valeur du rapport S_i/S_e en tête de réseau est en général supérieure à la valeur m prise comme hypothèse. Autrement dit, la non-localisation, ou mieux, le risque de concentration des surfaces; conduit à un surdimensionnement qui n'est évidemment pas applicable au niveau de la station de pompage, et jusqu'au premier nœud du réseau.

c) Détermination de la valeur σ .

L'unité de surface σ représente la superficie moyenne des surfaces engagées à l'irrigation; c'est évidemment une notion assez théorique découlant d'une schématisation du problème.

On peut déterminer une valeur de σ par une condition à l'origine, en ramenant le problème à l'appréciation de la surface S_0 , représentant le risque de concentration maximale des irrigations.

En effet, si l'on écrit :

$$S_0 = k\sigma$$

k représente la valeur maximale de n pour laquelle $\theta = 1$, lue directement sur la courbe universelle.

En définitive, la méthode qui vient d'être exposée permet de déterminer une

2/

variation logique du rapport $\theta = f(S_0)$, à partir des hypothèses donnant m , valeur atteinte par ce rapport pour une surface équipée suffisamment grande et la surface S_0 , représentant le risque maximal de concentration des irrigations.

3. Formule de la demande dans le cas du rapport d'irrigation variable.

Nous avons vu plus haut (1) que la probabilité élémentaire de la formule de la demande, s'écrivait :

$$p = \frac{D}{r_r R d} = \frac{f S_i}{r_r R d}$$

en introduisant le rapport d'irrigation θ et en considérant les relations :

$$\theta = \frac{S_i}{S_c} \quad s = \frac{d}{f} \cdot r_p \quad R = \frac{S_c}{s}$$

il vient une nouvelle expression de p :

$$p = \frac{r_p}{r_r} \cdot \theta \quad (5)$$

et la formule de la demande devient :

$$Q = d \left[R \cdot \frac{r_p}{r_r} \theta + U \sqrt{R \cdot \frac{r_p}{r_r} \theta \left(1 - \frac{r_p}{r_r} \theta \right)} \right] \quad (6)$$

formule dans laquelle θ est défini par la relation (4).

4. Formule d'addition-rotation.

Nous citerons pour mémoire la relation suivante, employée quelquefois sur de très petits réseaux. On

considère le nombre fictif de mains d'eau nécessaire à la desserte de la surface irriguée, à rendement horaire constant et en supposant certaines compensations au niveau des antennes :

$$Q = d \cdot \frac{S_i}{s} = d \cdot \frac{S_i}{S_c} \cdot \frac{S_c}{s} = d \cdot \theta \cdot R$$

Cette relation peut encore s'écrire, en remarquant que $(d/s) = (f/r_p)$:

$$Q = \frac{f S_i}{r_p} = \frac{D}{r_p}$$

d'où :

$$Q = \frac{D}{r_p} = R d \theta \quad (7)$$

Cette formule ne présente d'autre intérêt que celui de sa simplicité; elle est optimiste au niveau des antennes, et pessimiste pour un grand nombre de prises, puisque la formule ignore les compensations dans le temps. Son emploi n'est justifié que pour les très petits réseaux et dans la mesure où l'on considère que l'hypothèse principale est faite sur la valeur du rapport θ .

5. Formule de la demande généralisée.

Les hypothèses effectuées pour l'établissement des diverses relations supposaient une « population » unique de prises, les paramètres et notamment la valeur de la probabilité élémentaire p étant des valeurs moyennes.

Ces hypothèses sont mises en défaut par l'adoption de classes de prises relatives au débit unitaire en fonction de la structure du parcellaire, ce qui oblige le projeteur, pour ne pas alourdir les calculs, à adopter une valeur moyenne.

L'introduction du calcul par ordinateurs a permis de prendre en considération des hypothèses plus diversifiées, en envisageant des sous-populations de prises et à la limite, en considérant chaque prise avec ses paramètres propres. Ceci conduit à la formule de la demande généralisée, définie par MM. de Boissezon et Haït dans un article publié dans la revue *La Houille Blanche* en 1965.

L'établissement de la relation générale s'appuie sur les propriétés générales des fonctions de variables aléatoires et sur les propriétés particulières de la fonction de Gauss.

La formule de la demande s'écrit :

$$Q = Rpd + U \sqrt{Rpqd^2}$$

ou :

$$Q = \text{valeur moyenne du débit} + U \sqrt{\text{variance du débit} (*)}$$

Si à l'intérieur de la population totale, on considère des sous-populations i comportant R_i prises de débit unitaire d_i et de probabilité p_i , la loi de Gauss se conservant par addition de variables aléatoires, on peut écrire :

$$Q = \sum \text{valeurs moyennes} + U \sqrt{\sum \text{variances}} \\ = \sum R_i p_i d_i + U \sqrt{\sum R_i p_i q_i d_i^2}$$

En poussant encore plus loin le raisonnement, chaque prise i ayant un débit d_i , et une probabilité p_i , on démontre, en calcul de probabilité, qu'une somme de variables aléatoires indépendantes, suivant chacune une loi binomiale, tend pour R assez grand, vers une loi réduite de caractéristiques :

$$\text{moyenne} = \sum p_i d_i$$

$$\text{variance} = \sum p_i q_i d_i^2$$

d'où la formule générale :

$$Q = \sum_{i=1}^{i=R} p_i d_i + U \sqrt{\sum_{i=1}^{i=R} p_i q_i d_i^2} \quad (8)$$

6. Incidence des fuites et des limiteurs de débits.

On admet traditionnellement, en écoulement sous pression, qu'il existe des fuites systématiques (presse-étoupe, purgeurs, etc.) dont il faut tenir compte en majorant le débit calculé d'un coefficient de sécurité.

Dans le cas particulier des réseaux d'irrigation par aspersion, il existe un risque supplémentaire de dépassement du débit calculé, du fait de la tolérance de coupure des limiteurs de débits.

En effet, la courbe de fonctionnement (H, Q) d'un limiteur de débit est représentée selon le graphique 3 ci-après.

Si, effectivement, le limiteur de débit joue son rôle et fonctionne en coupure au-dessus de son débit

nominal, la tolérance sur le débit délivré à une prise peut atteindre 20 %.

Il serait défavorable de considérer que tous les limiteurs de débit d'un réseau sont simultanément en coupure à la tolérance maximale. Mais il est également prudent de tenir compte de ce phénomène par l'adoption d'un coefficient de sécurité par rapport au débit calculé.

Dans la pratique, les projeteurs appliquent un coefficient de sécurité unique pour tenir compte des deux phénomènes, coefficient que nous proposons de retenir égal à 10 %.

$$Q = 1,1 Q \text{ calculé}$$

Incidence des différents paramètres Discussion

1. Liberté de la distribution.

Lorsque l'on parle de réseaux fonctionnant « à la demande », il est courant de définir ce mode d'utilisation par le fait que l'utilisateur doit pouvoir utiliser sa prise quand bon lui semble, sans tour d'arrosage ou rotation préétabli, le réseau étant calculé en conséquence.

Si la définition est correcte du point de vue du fonctionnement du réseau, elle est malgré tout incomplète, car elle ne prend pas en considération la souplesse réelle d'utilisation offerte, qui dépend essentiellement de l'affectation débit-surface au niveau de la parcelle ou de l'îlot d'irrigation et, éventuellement, de la densité du bornage mis en place.

On peut définir la souplesse, ou « liberté » de la distribution de la manière suivante.

Un bornage étant réalisé avec une densité telle qu'à chaque prise capable du débit d , correspond une surface de l'îlot élémentaire d'irrigation s , on a vu que, pour satisfaire les besoins en eau pendant la période de pointe, la probabilité de fonctionnement de la prise était :

$$p = \frac{r_p}{r_r} \cdot \theta$$

et comme, au niveau de l'îlot d'irrigation, le rapport θ est pris égal à l'unité :

$$p = \frac{r_p}{r_r}$$

La liberté de la distribution, d'autant plus grande

(*) En effet, selon une identité classique entre les moments :

$$\text{variance} = \sigma^2 = \mu_2 - \mu_1^2 = Rpd^2 - R^2p^2d^2 \\ = Rpd^2(1 - p) = Rpqd^2.$$

que p est faible, peut être représentée par la probabilité contraire $1 - p$, ou :

$$1 - \frac{r_p}{r_r}$$

M. Clément propose l'utilisation d'un indicateur de liberté relatif, défini par la relation :

$$l_i = \frac{1 - p}{p - p_0}$$

dans laquelle p_0 représente la probabilité minimale qui peut se présenter, soit :

$$p_0 = \frac{nt}{r_r T}$$

n : étant le nombre d'arrosages pendant la période $r_r T$, égal au rapport entre la dose réelle d'un arrosage et les besoins en eau de la période de pointe réelle $r_r T$;

t : étant la durée d'un arrosage.

Afin de fixer les idées et d'estimer l'ordre de grandeur du coût relatif de la liberté, nous avons chiffré, sur un périmètre type, les variations de l'investissement à l'hectare équipé, et ce, pour différentes valeurs du rapport d'irrigation, en fonction du degré de liberté de la distribution.

Le calcul peut être conduit de deux manières, selon que l'on considère comme constante la surface de l'ilot élémentaire desservi par une prise, ou au contraire la valeur de la main d'eau ou débit unitaire de la prise. Dans le premier cas, l'investissement est simplement modifié par le changement de diamètres des canalisations, le linéaire restant invariant; dans le second cas, le linéaire est modifié par augmentation de la densité des « antennes ».

Il apparaît des courbes de variation, à concavité tournée vers le haut, plus ou moins accusée selon les hypothèses admises. En variation relative, on trouve un faisceau de courbes se déplaçant entre deux courbes extrêmes. On notera simplement qu'entre les variations extrêmes étudiées, correspondant aux valeurs de l'indicateur de liberté 0,5 et 7, l'accroissement relatif de l'investissement peut se situer entre 25 et 50 %.

L'augmentation assez sensible du coût de l'investissement avec la liberté de distribution conduit souvent, dans des régions où l'économie des projets doit être regardée de manière très stricte, à réaliser des conditions de bornage assez sévères (rendement horaire à la prise compris entre 13/24 et 16/24). Ces dispositions amènent, dans le cas de parcellaire morcelé, à admettre plusieurs utilisateurs sur une même prise (jusqu'à 4), qui doivent s'entendre pour la mise en place d'un micro-tour d'arrosage à l'intérieur de l'ilot d'irrigation et même sur la répartition des consommations enregistrées au compteur de la prise, dans la mesure où il n'est pas techniquement possible de réaliser des comptages divisionnaires corrects à l'aval d'un limiteur de débit.

2. Rapport ou « densité » d'irrigation.

L'incidence de la valeur du rapport d'irrigation m et de ses variations à l'intérieur du périmètre, sur le

4/ Exemple de variations du coût de l'investissement à l'hectare équipé, en fonction de la liberté de la distribution.

Périmètre type $S_e = 2\,000$ ha, comprenant réseau et station de pompage. $f = 0,45$ l/s.ha, $r_r = 1$, $P_q = 95$ %.

Example of initial outlay (per irrigable hectare) in terms of distribution liberty.

Representative service area $S_e = 2,000$ ha, including network and pumps. $f = 0.45$ l/sec.ha, $r_r = 1$, $P_q = 95$ %.

5/ Courbe de variations de l'investissement à l'hectare équipé I/S_e et de l'investissement à l'hectare irrigué I/S_i , en fonction du rapport d'irrigation $m = S_i/S_e$.

Périmètre type $S_e = 2\,000$ ha, comprenant réseau et station de pompage. $f = 0,45$ l/s.ha, $r_p = 16/24$, $P_q = 95$ %, H_r station = 120 m, $\sigma = 10$ ha.

Variation of initial outlay per irrigable hectare I/S_e and per hectare irrigated I/S_i , in terms of irrigation ratio $m = S_i/S_e$.

Representative service area $S_e = 2,000$ ha, including network and pumping station. $f = 0.45$ l/sec.ha, $r_p = 16/24$, $P_q = 95$ %, H_r station = 120 m, $\sigma = 10$ ha.

6/ Secteur de Buzet
($S_e = 1\,320$ ha).
Variation du rapport S_i/S_e
(1964).

Buzet sector
($S_e = 1\,320$ ha).
Variation of S_i/S_e (1964).

débit, et par suite sur le coût de l'investissement, est relativement importante.

Pour mieux situer ces variations, nous avons reporté, sur un graphique annexe, les valeurs de l'investissement à l'hectare équipé (I/S_e) et de l'investissement à l'hectare irrigué (I/S_i) en fonction de la valeur adoptée pour le rapport d'irrigation m , pour un périmètre type.

Il apparaît qu'entre la valeur $m = 0,6$, couramment admise en zone d'irrigation de complément et la valeur $m = 1$ (irrigation totale), l'écart relatif en investissement est de l'ordre de 25 % par rapport à la valeur $m = 0,6$. C'est dire l'importance de l'option prise dans le choix de ce rapport au moment de l'équipement du périmètre.

Des études, relativement longues et difficiles, tendant à la possibilité d'une détermination plus sûre de ce rapport optimal, ont été entreprises par la considération de modèles mathématiques d'exploitation où l'irrigation rentre comme variable.

Par ailleurs, on a pu se demander si les considérations très théoriques conduisant à adopter des valeurs variables du rapport S_i/S_e en fonction de l'importance de la surface équipée, n'étaient pas contredites par les faits, car il est bien certain qu'il existe un certain nombre de raisons pour que le phénomène de répartition des surfaces irriguées

dans un périmètre ne soit pas complètement aléatoire.

C'est ainsi qu'au cours de l'été 1964, en liaison avec la Section technique centrale des travaux d'Hydraulique, des relevés ont été effectués sur des périmètres de la Compagnie d'aménagement des Coteaux de Gascogne au cours de développement, l'un de 1 300 ha, situé dans la vallée de la Garonne, l'autre de 300 ha, situé dans la zone des coteaux proprement dits. Les courbes réelles, comparées aux courbes hypothèses et à un certain nombre de courbes théoriques, sont données en annexe.

Si l'on retrouve bien dans la réalité le phénomène de concentration pour les faibles surfaces et une stabilisation du rapport pour des surfaces plus importantes, les courbes accusent nettement un creux pour les surfaces moyennes. On peut penser que ce phénomène est dû au développement des réseaux par « taches d'huile », autour d'agriculteurs dynamiques, alors qu'au contraire, certaines zones démarrent beaucoup plus lentement.

3. Rendement horaire et qualité de fonctionnement.

Le raisonnement qui a conduit à l'établissement de la formule de la demande, suppose les irrigations concentrées sur une période $T' < T$, définie par la relation $T' = r_r T$, r_r étant le rendement en

7/ Secteur de Lavit
($S_e = 320$ ha).
Variation du rapport S_i/S_e
(1964).

Lavit sector ($S_e = 320$ ha).
Variation of S_i/S_e (1964).

temps d'utilisation du réseau. Ce raisonnement implique qu'aucune irrigation n'ait lieu pendant le temps $T - T'$.

En réalité, il n'en est pas ainsi, et l'on constate effectivement sur les enregistrements de débit que, pendant les périodes de pointes, il est extrêmement rare de rencontrer des chômages totaux de réseaux. On peut cependant considérer que le facteur r_p est un facteur de sécurité augmentant la probabilité élémentaire p pour tenir compte de ses variations autour de la moyenne, ce schéma remplaçant celui dans lequel p serait constant pendant la période T' et nul pendant la période $T - T'$.

Les valeurs à admettre pour ce rendement horaire sont très discutées par les projeteurs, variant de 16/24 à 1. Ce choix est d'autant plus important qu'il a une influence assez considérable sur l'évaluation du débit.

Sur le plan intellectuel, on peut penser que, même si au début du fonctionnement d'un réseau, le rendement est inférieur à 1 du fait de la très grande liberté permise par le réseau, il tendra vers l'unité au fur et à mesure que le réseau tendra vers la saturation, les agriculteurs prenant l'habitude d'arroser à toute heure du jour et de la nuit.

A l'inverse, on peut également faire valoir que le cycle solaire est un facteur d'orientation très net des arrosages, d'autant plus important dans les réseaux (ou les quartiers de réseaux) où s'installe une certaine monoculture, du fait des similitudes des conditions d'irrigation et de la préférence qu'ont les irrigants, surtout avec de la main-d'œuvre salariée, pour situer les déplacements de matériel le matin et le soir. On a même vu le cas d'agriculteurs qui chargeaient l'un d'eux de les réveiller la nuit pour effectuer à la même heure les déplacements de matériel!

En réalité, comme on le verra plus loin, l'étude des enregistrements aux stations de pompage, montre qu'à ce niveau le rendement du réseau est très voisin de l'unité (compris entre 0,9 et 1), mais il n'est pas certain qu'il en soit de même au niveau des antennes où les renseignements manquent, du fait de la difficulté que l'on éprouve à enregistrer les débits.

Nous pensons personnellement, afin de ne pas multiplier les hypothèses arbitraires, qu'il est logique d'adopter un rendement horaire du réseau voisin de l'unité, valeur que nous avons admise à la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne depuis plusieurs années. Mais il serait sans doute important, malgré les difficultés et le temps que cela prend, d'étudier systématiquement, sur certains réseaux et à des niveaux différents, l'évolution des enregistrements de débit en période de pointe.

Quant à la qualité de fonctionnement, l'option demeure entre les valeurs 95 et 99 %. Mais il s'avère que c'est de beaucoup le paramètre qui joue le moins sur l'économie du réseau et que par conséquent, on aurait tort de se priver de cette sécurité au niveau où elle est la plus importante, celle des antennes. Nous rejoignons ainsi, par d'autres voies, les conclusions de M. Clément proposant de retenir 99 % pour les petits réseaux ou les extrémités des grands réseaux et d'adopter 95 % à partir d'une certaine dimension de réseau.

4. Etude statistique des débits sur des réseaux en fonctionnement.

Avec le souci de vérifier expérimentalement des lois théoriques, on a pu, au cours de l'été 1964, étudier les phénomènes d'appel de débit sur des réseaux en fonctionnement, en disposant des enregistrements de débit au niveau des stations de pompage, et en effectuant une enquête sur les périmètres, en vue de la détermination des surfaces réellement irriguées, des volumes consommés, et du nombre de prises effectivement irriguées.

8/ Exemple de variations des débits enregistrés en tête de réseau.

Examples of discharge variations observed at the head of the network.

9/ Secteur de Buzet ($S_e = 1\,320$ ha). Répartition statistique des appels de débit à la station du 15 au 31 juillet 1964.
Buzet sector ($S_e = 1\,320$ ha). Statistical distribution of flows supplied by the plant from the 15th to 31st July 1964.

L'étude statistique des appels de débit à la station pendant la période de pointe, en prenant un découpage horaire par exemple, permet de déterminer la répartition et de vérifier s'il est effectivement possible d'ajuster une loi normale à la répartition expérimentale. Si cet ajustement est réalisable, il est relativement aisé, connaissant la valeur moyenne et la variance, de déterminer les paramètres de la formule de la demande correspondant à cette répartition.

On constate effectivement que l'ajustement à une loi normale est possible dans la plupart des cas, autrement dit que l'appel des débits, au niveau de la station, constitue bien un phénomène aléatoire.

Par contre, en recherchant les paramètres moyens de la formule de la demande, on peut effectuer les remarques suivantes :

- comme il a été dit plus haut, le rendement horaire du réseau, déduit de la valeur moyenne de la distribution, est très voisin de l'unité (0,95 en général);
- sur certains réseaux, la variance expérimentale conduit effectivement à un débit moyen des prises correspondant à la liberté réelle;
- sur d'autres réseaux, le débit moyen calculé est nettement supérieur au débit correspondant à la liberté réelle, le rapport pouvant atteindre les coefficients 5 et 6. Autrement dit, tout se passe comme si les prises n'étaient pas complètement indépendantes, mais fonctionnaient par « groupes » de 5 ou 6. On trouvera, en annexe, le graphique de répartition correspondant à un tel cas.

Conclusion

Il n'existe pas, en fait, de règle d'or pour le calcul des débits dans les réseaux d'irrigation; comme dans beaucoup de techniques, on a pu mettre au point des formules, mais dont les paramètres restent soumis à l'appréciation du projeteur dans chaque cas particulier, avec la préoccupation de l'incidence économique, et de l'adaptation la meilleure possible à une évolution très mal connue.

Il n'en apparaît pas moins l'énorme intérêt pour les maîtres d'ouvrages, et c'est une résolution que nous avons prise, de suivre l'évolution des réseaux dans le temps en mettant en place, chaque fois que possible, des dispositifs de mesure qui permettront de disposer d'un échantillonnage correct des phénomènes, afin de corriger, éventuellement, les normes de calcul des futurs réseaux.

Discussion

Président : M. DROUHIN

M. de BOISSEZON remercie M. BOURLA d'avoir présenté le travail effectué l'an dernier par M. Haït et lui-même, et veut apporter à cet exposé un correctif de détail :

L'application de la généralisation de la formule de Clément, qui tient compte des probabilités d'utilisation de chaque prise en calcul manuel, n'est pas impossible. Cela se fait à peu près à la même vitesse qu'un calcul ordinaire grâce à un système d'abaques.

L'ensemble hydraulique constitué par un réseau est fait de la réunion de plusieurs sous-ensembles agronomiques. C'est donc une moyenne des moyennes que M. BOURLA applique au calcul des débits, ce qui justifie l'adoption du coefficient de sécurité en extrémité retenu par M. BOURLA.

L'extension de la formule de la demande que nous avons proposée tient compte des données précises de chaque point de distribution et évite cette sécurité.

La sécurité qui consiste en la modification du taux de satisfaction justifié par M. Clément paraît bien préférable.

Quant à l'incertitude des données agronomiques citée par M. BOURLA, on peut dire que les données point par point, qui servent de base au calcul que nous préconisons, se réfèrent à l'irrigation du système cultural optimal déterminé par les études préliminaires. Si, donc, ces données contraignent l'utilisateur, elles ne le font que dans un sens qui lui est favorable.

M. BOURLA répond que la détermination de données de bases précises au niveau de l'ilot d'irrigation lui semble

impossible dans l'état actuel des connaissances, et que par conséquent il préfère s'en tenir à une méthode d'« enveloppe ».

M. PORCHERON fait remarquer que toutes les formules employées par M. BOURLA sont tirées de la formule générale $M = \text{moyenne} + U \sqrt{\text{variance}}$. Les formules employées par les différentes compagnies aboutissent, à peu de choses près, aux mêmes résultats, sauf en bout d'antennes.

Il ne faut pas trop se leurrer sur les appréciations individuelles de différentes Sociétés quant aux applications de cette formule très générale, les paramètres étant égaux, les différences sont très voisines sur les bouts d'antennes qui ne représentent au total qu'un coût d'investissement relativement faible.

M. BOURLA répond que cette affirmation n'est pas entièrement exacte; en ce qui concerne la variation du rapport S_1/S_c , qui fait l'originalité de la formule préconisée par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, on a pu se rendre compte que le débit de pointe calculé en tête de gros périmètres (4 000 ha), pouvait varier du simple au double selon les hypothèses faites sur ce seul paramètre.

M. le Président remercie M. BOURLA de son rapport qui l'a personnellement beaucoup instruit sur cette question de modèle mathématique. Le problème réside dans le fait que l'on considère aléatoires des phénomènes qui ne le sont pas tellement.