

Étude de la nappe phréatique de la basse Durance

The water table in the lower Durance basin

PAR J. LARRIEU

CHEF DE LA DIVISION « ÉTUDES STATISTIQUES » A ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

Problème posé, à l'occasion de l'aménagement de la basse Durance, par le détournement des eaux dans un canal imperméable : rapport entre la nappe phréatique du bassin alluvial de la rivière et les différents éléments physiques susceptibles de l'influencer.

Complexité d'une solution par les méthodes hydrauliques classiques. Etude statistique s'appuyant sur les relevés de débits, de précipitations et de niveaux de nappe dont on disposait sur le bassin.

Résultats : indépendance relative du niveau de la nappe vis-à-vis du débit de la rivière et des précipitations sur le bassin; dépendance plus étroite de ce niveau par rapport aux abondantes irrigations pratiquées dans la région; méthode de prévision à moyen terme des niveaux de la nappe.

The author describes the problem that had to be solved when development of the lower Durance necessitated its being diverted through an impermeable canal. The problem consisted of correlating water table variations in the river's alluvial basin with the various physical factors likely to affect it.

The complexity of finding a solution by conventional methods made it necessary to undertake a statistical study based on flow, rainfall and water table observations in the basin.

The results show the relative independence of the water table with respect to river flow and rainfall in the basin, and that there is a closer relationship between the water table and the intensive irrigation carried on in the district. A method is given of making medium range forecasts of the depth of the water table.

Il arrive très souvent en hydrologie que les phénomènes soient tellement complexes qu'il s'avère impossible de les étudier par les méthodes directes, naturelles *a priori*. On a déjà rencontré ces difficultés dans les études de crues. On les rencontre dans beaucoup d'autres domaines et en particulier dans les études de nappes souterraines.

Ces dernières, en effet, mettent en jeu des influences très complexes et leur analyse exige la prise en compte d'un très grand nombre de paramètres hydrologiques, météorologiques et géologiques souvent difficiles à déceler et impossibles à chiffrer.

Par suite, il semble assez naturel dans un tel cas de faire appel à l'analyse statistique puisque le nombre de facteurs causals est très grand.

Nous avons fait porter notre étude sur la Basse-Durance en raison du matériel statistique qui s'offrait à nous : de nombreux relevés ont été

effectués dans la région depuis une douzaine d'années, si bien que nous disposions d'une série de chiffres permettant des analyses sérieuses.

Nous nous sommes proposé d'étudier les problèmes suivants :

1) Etude statistique du niveau moyen mensuel de la nappe en un certain nombre de points d'observation.

2) Relation entre le niveau de la nappe et les différents facteurs hydrométéorologiques du bassin.

3) Prévision à courte échéance des variations de niveau de la nappe.

Le matériel statistique a été constitué par les relevés effectués en un certain nombre de puits de la région de Pertuis-Cadenet, les débits de la station Mirabeau sur la Durance, et les précipitations recueillies sur le bassin par les pluviomètres de la Météorologie Nationale.

I. — ÉTUDE DU NIVEAU MOYEN MENSUEL.

La variable n étudiée est la profondeur du plan d'eau dans les puits de mesure, repérée à partir de la margelle.

On peut certainement admettre que le niveau de la nappe en un point donné dépend d'une multitude de facteurs d'importance et de complexité très variables. Si on isole certains paramètres, tels que : débit en Durance, précipitations et irrigations sur le bassin, il en reste un grand nombre d'autres qui contribuent à former le niveau observé (perméabilité du terrain, température, etc.). Par conséquent, l'analyse directe et physique du niveau soulève des problèmes très complexes difficilement abordables dans l'état actuel des connaissances en hydraulique souterraine.

L'emploi d'un schéma statistique se révèle donc très fécond, puisqu'il tient compte de la nature « aléatoire » — au niveau de notre connaissance — du phénomène étudié. La statistique trouverait encore sa justification, si besoin était, dans le nombre considérable de paramètres qui interviennent pour conditionner l'état de la nappe ; on sait, en effet, qu'un phénomène résultant d'une multitude d'effets d'importance équivalente obéit bien aux schémas statistiques.

Il ne s'agit pas ici de provoquer une querelle scientifique entre déterminisme et indéterminisme, le niveau de la nappe est parfaitement déterminé par la connaissance de tous les paramètres, initiaux ou non, peu importe.

La chose importante à retenir est que le schéma statistique représente d'une façon satisfaisante les variations de niveau de la nappe.

Ce schéma statistique prend la forme suivante :

On décompose l'année en périodes mensuelles pendant lesquelles on mesure le niveau de la nappe. La description de cette dernière est effectuée de la façon suivante :

On établit en chaque point de la nappe les lois de probabilité suivies par les niveaux moyens mensuels, telles qu'elles ont pu être déterminées sur les années d'observation.

Définition de la loi de probabilité du niveau moyen mensuel :

C'est la donnée pour chaque niveau possible n_i de la fréquence moyenne avec laquelle le niveau observé pendant une suite d'années peut tomber en dessous de n_i . Cette fréquence est donnée en pourcentage.

Un niveau de probabilité 5 % est un niveau n_i tel que cinq fois sur cent en moyenne, le niveau observé tombe en dessous de n .

On verra (fig. 1), tracés pour quelques puits sur un même graphique, les niveaux effectivement observés de 1946 à 1957 et les niveaux correspondants de fréquence 5 % et les niveaux de fréquence 95 %. On doit s'attendre à voir la courbe réelle sortir de la bande ainsi définie une fois sur dix environ pour chaque mois de l'année.

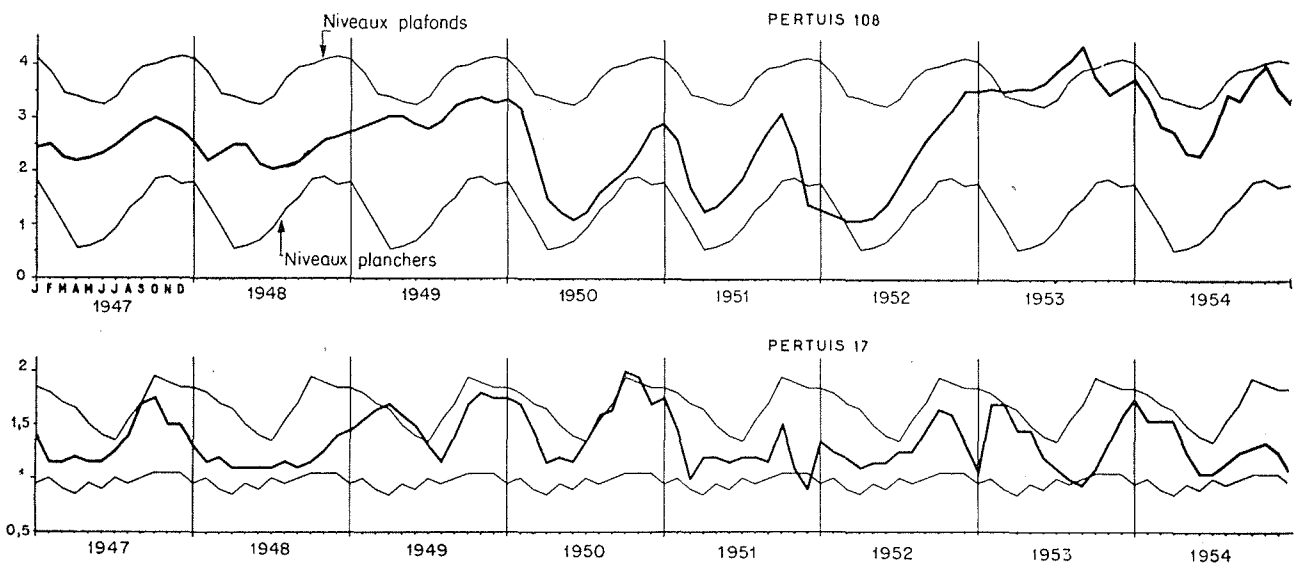


FIG. 1.

Détermination de la loi de probabilité des niveaux moyens mensuels.

On est obligé de considérer séparément chaque mois de l'année, car le niveau de la nappe est soumis à une forte influence saisonnière, qui rendrait impossible une comparaison entre niveaux d'époques différentes : tel niveau très fréquent en hiver est très rare en été et réciproquement.

Mais au lieu de séparer l'année en douze périodes d'un mois dont on a étudié séparément les lois de probabilité, on aurait pu se contenter de la séparer en trois ou quatre périodes seulement, chacune d'elles contenant plusieurs mois. Ceci aurait simplifié et amélioré les calculs à certains points de vue :

Simplification : Au lieu d'avoir à déterminer douze lois de probabilité, nous n'en aurions eu que trois ou quatre.

Amélioration : Chaque loi aurait été déterminée à partir d'un nombre de points plus grand (trois fois plus grand dans le cas de trois périodes de quatre mois), d'où amélioration apparente de l'estimation.

Mais les inconvénients étaient trop graves pour qu'on puisse utiliser ce procédé. En effet, les estimations statistiques classiques n'ont de valeur que dans la mesure où les éléments successifs étudiés ne varient pas en fonction du temps et

restent indépendants entre eux. Ce n'est pas le cas ici, où la variation saisonnière est sensible d'un mois à l'autre et la corrélation entre niveaux moyens mensuels successifs très forte.

a) FORME ANALYTIQUE DE LA LOI DE PROBABILITÉ :

Le niveau de la nappe résultant d'un nombre considérable de facteurs d'importance variable, mais dont la plupart sont comparables, la loi de Laplace-Gauss s'imposait *a priori*. Les essais et comparaisons effectués ont montré la validité de ce choix (fig. 2).

Par suite, le niveau n_p de probabilité p (niveau réel observé p fois sur 100 en moyenne inférieur à n_p) est défini de la manière suivante :

$$p = \frac{1}{\sqrt{2} \pi} \int_{-\infty}^{n_p} e^{-1/2 [(n-\bar{n})/\sigma_n]^2} dn / \sigma_n = P [(n_p - \bar{n}) / \sigma_n]$$

Dans cette formule, \bar{n} et σ_n sont respectivement la moyenne et l'écart-type de la variable étudiée n et la fonction $P(X)$ est tabulée dans les tables de K. Pearson (1).

Les deux quantités \bar{n} et σ_n sont estimées à partir des séries d'observation au moyen des formules suivantes bien connues :

$$\bar{n} = \frac{\sum n_i}{N}; \quad \sigma_n = \sqrt{\frac{\sum (n_i - \bar{n})^2}{N}}$$

(1) Biometrika Tables for statisticians, by K. PEARSON. Cambridge University Press.

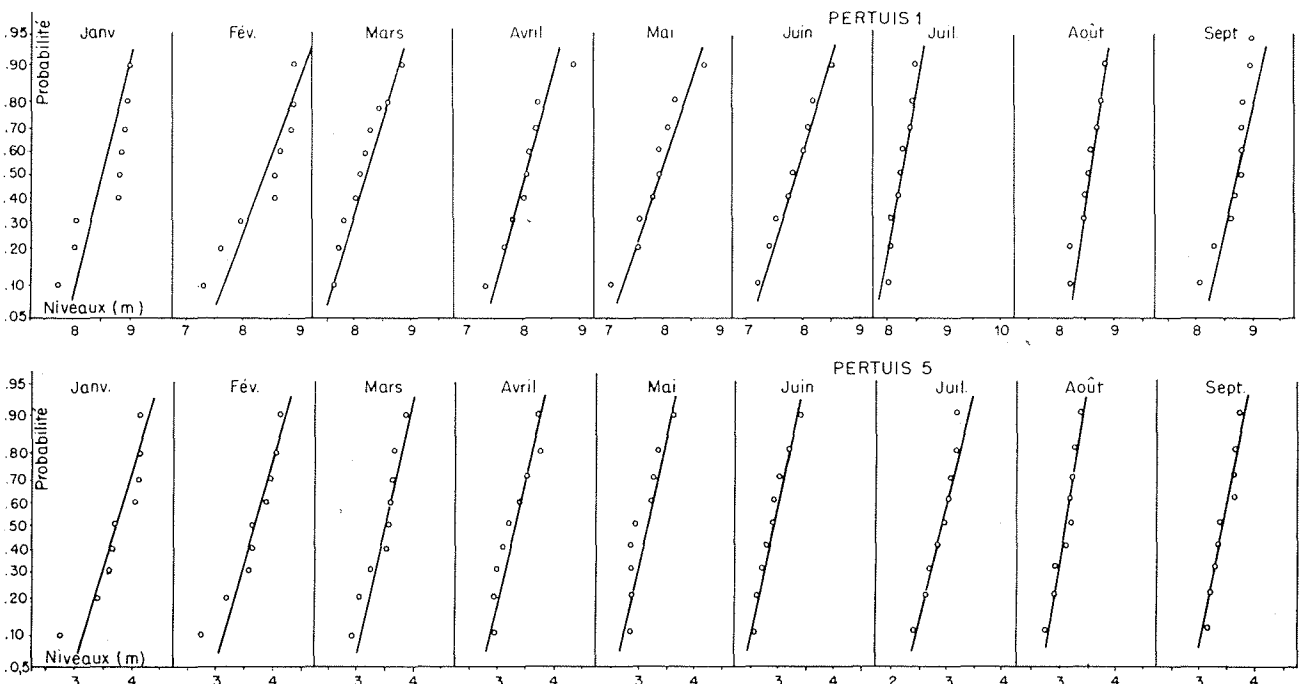


FIG. 2
Lois de probabilité des niveaux moyens mensuels.

les sommes étant étendues à l'ensemble des N années d'observation.

b) ERREURS D'ÉCHANTILLONNAGE :

La véritable loi — si elle existe — à laquelle obéit le niveau moyen d'un mois n'est pas connue; on l'estime sur l'échantillon observé au moyen des valeurs \bar{n} et σ_n indiquées plus haut. D'un échantillon à l'autre, ces valeurs changeraient.

N'ayant aucun moyen de connaître les « vraies valeurs » de \bar{n} et de σ_n , on utilise celles que four-

nissent les formules indiquées plus haut. Ce faisant, on commet une certaine erreur d'échantillonnage, car elle dépend de l'échantillon ayant servi au calcul (ici la période 1946-1957). Comme en calcul d'erreur, on ne peut connaître exactement les vraies valeurs, mais on peut déterminer des intervalles qui les contiennent avec une quasi-certitude. Les longueurs de ces intervalles sont proportionnelles à $1/\sqrt{N}$. Quand l'échantillon devient quatre fois plus important, l'intervalle d'incertitude devient deux fois plus court.

II. — RELATION ENTRE LE NIVEAU DE LA NAPPE ET LES FACTEURS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES DU BASSIN.

Les lois de probabilité calculées jusqu'ici sont les lois marginales, comme les appellent les statisticiens. On les utilise quand on ne possède aucune information sur les phénomènes connexes susceptibles d'influencer l'élément étudié.

Dans le cas présent, on peut penser *a priori* qu'il existe trois facteurs principaux susceptibles d'influencer le niveau de la nappe :

- le débit en Durance,
- les précipitations sur le bassin,
- les irrigations.

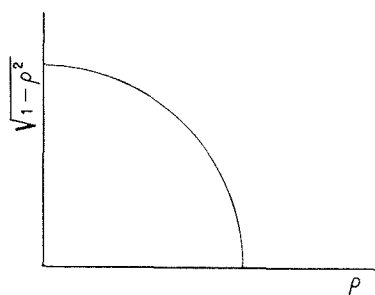
Si une telle action existe, elle sera mise en évidence par les corrélations entre la nappe et les différents facteurs énumérés et considérés séparément (2).

L'hypothèse la plus simple, celle qu'on fait presque toujours, explicitement ou implicitement lorsqu'on étudie la corrélation, est la suivante: les deux quantités x et y obéissent à une loi de Laplace-Gauss à deux dimensions. Cette loi est caractérisée par deux propriétés importantes: la valeur moyenne de y quand on connaît x est une fonction linéaire de x : $\bar{y}_x = ax + b$ et la dispersion de y quand on connaît x est constante quel que soit x et égale à $\sigma_y \sqrt{1 - \varrho^2}$, σ_y désignant la dispersion de y et ϱ le coefficient de corrélation entre y et x .

La réduction subie par la dispersion de y est donc considérable quand ϱ est grand, comme on peut le constater sur le graphique ci-contre.

On peut dire en définitive que y reste une quantité aléatoire, mais sa valeur moyenne de-

vient une fonction linéaire de x et sa dispersion est réduite de $1 - \sqrt{1 - \varrho^2}$.



a) INFLUENCE DE LA DURANCE :

La station de Mirabeau a été retenue pour représenter le débit de la Basse-Durance.

La liaison entre nappe et Durance a été ensuite étudiée de la façon suivante :

— En chaque puits de la zone d'étude, on a calculé, pour certains mois choisis en raison de leur intérêt, le coefficient de corrélation entre le niveau moyen mensuel de la nappe et le débit moyen mensuel logarithmique correspondant de la Durance à Mirabeau.

Le calcul a été d'abord conduit en prenant exactement les mêmes périodes pour la nappe et pour la Durance.

Comme un déphasage entre la variation de débit de la Durance et la réaction du niveau de la nappe était vraisemblable, les calculs ont été repris en effectuant la corrélation entre les niveaux moyens mensuels de la nappe et les débits moyens mensuels de la Durance déphasés de 5 en 5 jours depuis 0 jusqu'à 30 jours. En moyenne, sur l'ensemble des mois et sur l'ensemble des puits, la corrélation est maxima quand

(2) On devrait, en principe, considérer des corrélations multiples, mais le nombre d'observations qu'on possède est trop faible pour permettre l'emploi de cette méthode théoriquement plus correcte.

le déphasage est compris entre 15 et 25 jours. Les coefficients de corrélation calculés aux différents puits sont sensiblement du même ordre de grandeur et ils ne dépassent guère — 0,40 en hiver et — 0,15 en été.

Nous admettrons donc qu'il existe entre niveau moyen mensuel de la nappe et débit moyen mensuel de la Durance déphasé de vingt jours, un coefficient de corrélation moyen sensiblement égal à — 0,40 pour les mois d'hiver et pratiquement nul pour les mois d'été.

b) INFLUENCE DES PRÉCIPITATIONS :

Il est sans intérêt de considérer les précipitations mensuelles en un seul point de la région étudiée, en raison de la grande hétérogénéité du climat méditerranéen. Il faut donc utiliser la moyenne de plusieurs pluviomètres, ce qui diminue singulièrement les possibilités d'étude, car il est très difficile d'obtenir des relevés continus d'observations pluviométriques portant sur plusieurs années.

On a considéré les moyennes d'observations sur trois pluviomètres à peu près convenablement répartis dans la plaine alluviale de la Basse-Durance.

De la même façon que pour la Durance, l'effet éventuel des pluies a été recherché au moyen des corrélations entre niveaux moyens mensuels de puits et lames d'eau mensuelles précipitées, sans déphasage puis avec déphasage de 15 jours.

Les corrélations observées sont faibles, mais elles deviennent plus fortes quand on introduit le déphasage et présentent des variations intéressantes au cours de l'année : ρ est maximum pendant les mois d'hiver décembre à mars ou avril. En revanche, la période d'été est caractérisée par des valeurs très faibles de la corrélation et même par des valeurs positives.

Cette corrélation inverse d'été pourrait être l'indice de l'importance du rôle joué par le facteur irrigation. En effet, l'été, quand il pleut, on cesse d'irriguer; par suite, si les irrigations jouent un rôle prépondérant dans l'alimentation de la nappe, il est normal que le niveau de celle-ci baisse quand les irrigations sont interrompues, même s'il pleut à ce moment-là.

Il importe de noter que cette interprétation est évidemment assez fragile, puisqu'elle s'appuie sur des observations mensuelles, mais c'est la seule possible tant qu'on n'a pas d'observations directes sur les irrigations elles-mêmes.

c) INFLUENCE DES IRRIGATIONS :

Il n'est pas possible, pour l'instant, d'étudier directement l'influence des irrigations sur le niveau de la nappe, en raison des difficultés rencontrées dans la mesure des débits d'irrigation. Mais certains résultats — comme on l'a montré au paragraphe précédent — permettent de soupçonner que cette influence est importante, sinon fondamentale.

III. — PRÉVISION A COURTE ÉCHÉANCE DES VARIATIONS DE NIVEAU DE LA NAPPE.

On a vu plus haut comment — si deux phénomènes aléatoires sont corrélés — la connaissance de l'un d'eux diminue la dispersion de l'autre (la dispersion initiale est multipliée par $\sqrt{1-\rho^2}$, ρ désignant le coefficient de corrélation entre les deux quantités). Comme il existe une forte corrélation entre les niveaux de mois successifs, on peut, connaissant le niveau d'un mois donné, en déduire un intervalle réduit contenant le niveau du mois suivant avec une probabilité donnée à l'avance.

On a établi le tableau des corrélations entre niveaux moyens mensuels de mois successifs pour les différents puits étudiés de la région Pertuis-Cadenet. Ces corrélations sont de l'ordre de 0,85. Par suite, quand on connaît le ni-

veau d'un certain mois, janvier par exemple, le niveau de février est encore incertain, mais il se trouve, avec la même probabilité dans un intervalle deux fois plus petit que si on ne connaissait pas le niveau de janvier.

On trouvera (fig. 3) un exemple d'abaque permettant de calculer pour chaque mois les intervalles d'incertitude des niveaux en fonction des niveaux du mois précédent, et (fig. 4) un graphique, analogue à celui de la figure 1, mais où les intervalles marginaux sont remplacés par les intervalles réduits.

On pourrait faire des prévisions à deux mois d'intervalle mais les approximations seraient évidemment moins bonnes.

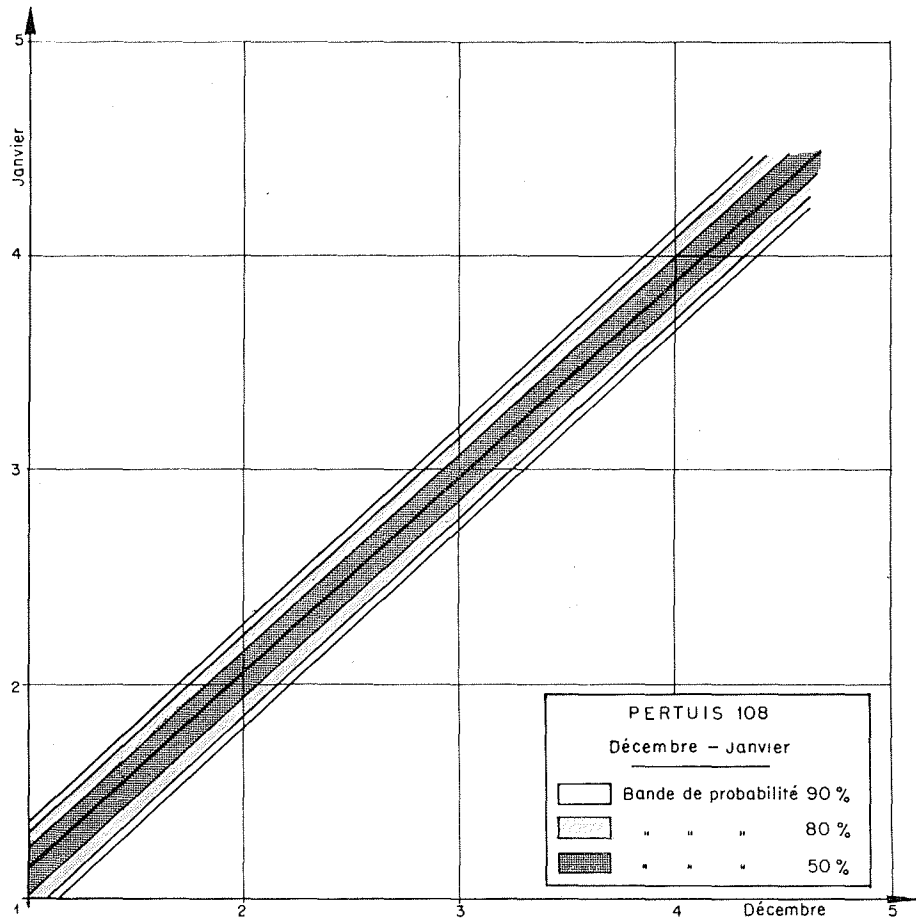


FIG. 3

Régression entre les niveaux moyens de deux mois successifs. Période 1946-1957.

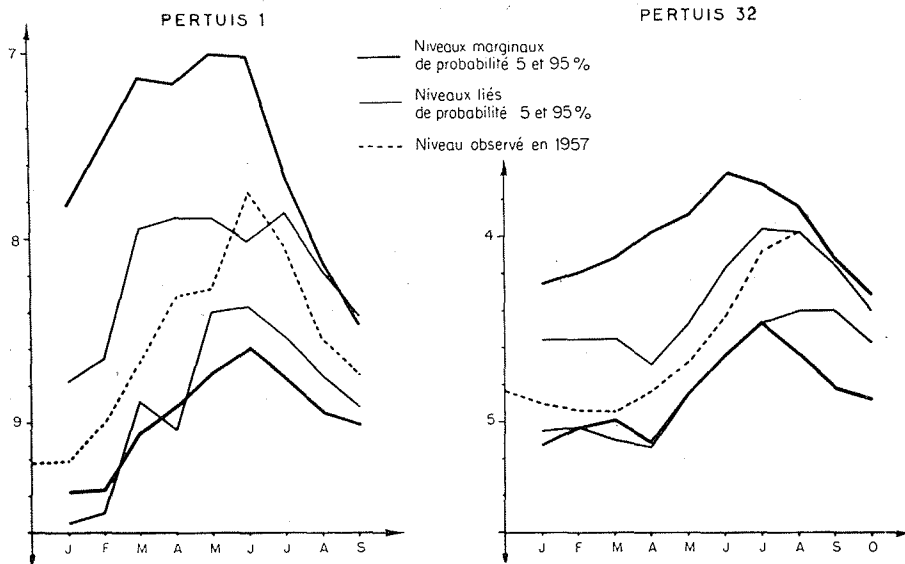


FIG. 4

Préviation à court terme de l'évolution de la nappe.

CONCLUSION

Cette étude montre comment la statistique peut apporter des réponses à des problèmes qui, abordés sous l'angle technique, s'avèreraient pratiquement insolubles.

Les méthodes indiquées sont de portée générale et seraient susceptibles d'applications très

diverses dans un grand nombre de domaines où l'on dispose de relevés de chiffres sûrs, mais où les méthodes directes se révèlent trop complexes pour donner des solutions utilisables. De ce fait, elles ouvrent la voie à des recherches ultérieures fructueuses.

DISCUSSION

Président : M. DUFFAUT

M. le Président remercie M. LARRIEU de son très brillant exposé :

M. HENRY pose deux questions :

1° La corrélation d'un mois sur l'autre est-elle plus ferme dans les périodes sèches (courbe de tarissement) ou dans les périodes humides (précipitations ou irrigation) ?

2° Ne doit-on pas considérer comme phénomène aléatoire l'époque de l'année à laquelle se produit tel événement lui-même aléatoire (minimum ou maximum par exemple) ?

M. LARRIEU répond :

1° Il a observé des mois à corrélation plus ou moins forte, mais cela n'indiquait pas significativement des périodes d'irrigation ou de précipitations.

2° L'époque de l'année où se produit l'événement est certainement aléatoire, mais l'introduction de cet élément — un peu subjectif — de choix aurait pu amener une incertitude supplémentaire, en raison de la pauvreté de l'échantillonnage dont on disposait (une dizaine de points).

M. OLIVIER MARTIN remarque que l'époque du maximum ou du minimum tient aussi, pour une part notable, à l'intervention humaine qui anticipe ou retarde le début des irrigations suivant l'état des terrains et par conséquent le régime des pluies. Dans ces conditions, la période de début des irrigations n'est pas fixe et il intervient un élément de volonté humaine qui ne peut pas être considéré comme un élément aléatoire.

M. LARRIEU indique qu'il y a, néanmoins, une grande régularité dans la mise en route des irrigations, de sorte que ce sont plutôt les précipitations qui constituent l'élément le plus fluctuant dans ce domaine.

M. FERRY estime qu'il est beaucoup plus commode de considérer la variabilité d'une grandeur aléatoire à une époque fixe que la variabilité de l'époque caractérisée par une grandeur fixée à l'avance.

M. LARRIEU conclut que le problème serait plutôt celui de l'homogénéité de la loi de probabilité, condition d'une application correcte de la méthode.

M. TISSIER demande à M. LARRIEU s'il n'a pas été gêné, dans son étude, par le fait que les débits de la Durançe au pont de Mirabeau n'ont pas été déterminés de la même manière pendant toute la période 1946-1957 :

— Avant 1951, environ, débits synthétiques;

— Depuis 1951, débits réellement mesurés.

Les deux séries ne semblent pas très homogènes.

M. LARRIEU répond que la différence, certaine en valeur absolue, entre débits synthétiques et débits naturels n'est guère sensible dans leurs corrélations avec les niveaux de la nappe.

En réponse à une question de M. GUILLIOT, M. LARRIEU précise que l'on observe une corrélation maximum entre le niveau d'un mois donné et le débit considéré sur une

période antérieure de 15 jours; il ajoute que ce fait, observé dans tous les cas, mais avec des valeurs très faibles, ne peut être considéré comme très significatif.

En réponse à une question de M. MÈLOT, M. LARRIEU indique que l'étude de l'influence de l'évaporation superficielle sur le niveau de la nappe phréatique serait très intéressante, mais qu'elle a été abordée d'une façon sommaire : il est, toutefois, peu vraisemblable que cet effet existe pour des nappes situées à une profondeur de 4 ou 5 mètres, comme c'est le cas en de nombreux points de la plaine en Basse-Durance.

M. le Président suggère de prendre comme paramètre, à la place des irrigations, difficiles à caractériser, la sécheresse qui pourrait déterminer ces irrigations.

M. LARRIEU répond à M. le Président :

1° On a d'abord songé à caractériser l'irrigation par la différence entre le débit d'entrée dans un canal et le débit de sortie, différence qui représenterait la part de l'irrigation dans la zone comprise entre ce canal et la Durance.

2° Une deuxième idée était d'essayer simplement d'étudier la corrélation entre le niveau de la nappe et le débit d'entrée qui est très régulier, malgré de petites variations en cours d'année.

3° Un coefficient de sécheresse serait probablement un paramètre intéressant, mais supposerait des mesures faites spécialement au cours des travaux.

M. HENRY propose de prendre, comme paramètre caractéristique de l'irrigation, la pente de la nappe entre deux points repérés sur sa direction générale d'écoulement : ceci semblerait convenir pour la vallée du Rhône, mais il n'en serait peut-être pas de même dans la vallée de la Durance.

M. LARRIEU remarque que l'idée suggérée par M. HENRY conviendrait certainement pour une expérimentation de nature physique, mais les résultats qu'elle donnerait ne pourraient être exploités statistiquement qu'avec un certain recul nécessaire pour assurer un nombre de données suffisant.

M. GUILLIOT estime qu'il ne paraît pas sans intérêt d'essayer une corrélation double entre le niveau de la nappe, d'une part, et les débits de la Durance et les précipitations, d'autre part, bien que l'échantillon ne donne que 12 points; cette corrélation double pourrait être meilleure que la corrélation simple.

M. LARRIEU pense, toutefois, qu'une corrélation double basée sur 12 points n'est guère significative, bien que non dépourvue d'intérêt; M. MORLAT confirme ce point de vue. M. LARRIEU explique, d'autre part, que l'augmentation du coefficient de corrélation n'est pas un but en soi, mais qu'il s'agit d'obtenir un coefficient qui se rapproche le plus possible de la réalité.

M. le Président remercie M. LARRIEU, qui n'est pour rien dans l'impuissance de ce dernier procédé à donner des résultats en l'absence d'éléments physiques, et le félicite pour l'intérêt qui a été marqué pour sa communication.