

METHODE D'ESTIMATION DES DEBITS D'ETIAGE DE FAIBLE FREQUENCE — APPLICATION A UNE RIVIERE DE MADAGASCAR

Marcel ROCHE
Ingénieur à Electricité de France

RÉSUMÉ

Cette étude montre comment l'on peut étendre une période d'observations de débits de basses eaux à une période plus longue correspondant à des observations de pluies.

Il est intéressant de soustraire aux débits reconstitués la portion la moins aléatoire correspondant au tarissement pur dont la loi peut, en général, être reconstituée avec une dispersion plus faible que celle des corrélations pluies-débits. L'opération nécessite le choix assez délicat d'une caractéristique de débit que l'on puisse considérer à date fixe, qui ne soit pas trop éloignée des hautes eaux pour être en bonne corrélation avec les pluies de cette période, et qui soit néanmoins, de façon certaine, sur la courbe de tarissement. C'est cette caractéristique à laquelle l'auteur a donné le nom de « charnière ».

L'application au bassin de la NAMORONA (Madagascar) constitue un exemple assez complet, les précipitations étant loin d'être négligeables durant la période de tarissement.

Il faut noter toutefois que la méthode exposée suppose un régime comportant des saisons pluvieuses et sèches nettement différenciées, ainsi que l'absence de neige.

SUMMARY

The author shows how one can extend a period of observations of low water discharge to a longer period referring to rainfall observations.

One should withdraw from the restored discharge value the least hazardous part corresponding to the pure recession values whose law can, as a rule, be reconstituted with a lower dispersion than that of rainfall-discharge correlations. However, such a calculation calls for a rather arduous selection of a discharge feature which may be considered as occurring at a regular date, not too far from the high water period in order to maintain correlation with the rainfall of the same period provided it can, in any case, be found on the recession graphic. The feature in the above, is the one which the author has named « CHARNIÈRE ».

Application of this method to the NAMORONA river basin (MADAGASCAR) sets up a rather complete example, for the rain falling during the recession period is far from being negligible.

One should, however, bear in mind that the method exposed in the above assumes that rain and dry periods are clearly differentiated and that snowfall is not to be reckoned with.

Il est bien connu des hydrologues que, de toutes les études qui leur sont soumises, l'estimation correcte des débits d'étiage est celle qui présente le plus de difficultés.

Ces débits sont en général moins bien connus, tout au moins en valeur relative, que les débits de moyennes et hautes eaux. Cela est dû principalement à la difficulté pratique des mesures directes (vitesses faibles, écoulement souvent irrégulier, faibles profondeurs) et souvent à l'influence des variations morphologiques du lit, plus sensible en basses eaux.

Néanmoins, la connaissance précise des débits d'étiage et de leur variabilité revêt dans maint projet une importance extrême, qu'il s'agisse de l'exploitation des centrales au fil de l'eau ou d'aménagements agricoles sans possibilité d'établir de grandes réserves.

La qualité des mesures directes est une question de technologie et aucune méthode

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 12648

16 DEC. 1963

de calcul ne peut pallier leur insuffisance. Mais par contre, les mesures étant ce qu'elles sont, on peut par des méthodes appropriées augmenter grandement l'utilité et la précision des renseignements fournis au projeteur.

Nous présentons ici un exemple d'étude de débits d'étiage se rapportant à un bassin tropical de MADAGASCAR : la NAMORONA. Ce bassin est relativement peu étendu (380 km²); il ne présente pas de tarissement continu, la courbe de récession étant continuellement perturbée par des précipitations de saison sèche. Les méthodes employées sont susceptibles de s'appliquer à de nombreux bassins, pourvu qu'ils présentent des saisons sèches et humides nettement différenciées.

1. EXPOSÉ DE LA MÉTHODE

Sur une rivière, on possède souvent une période d'observations hydrométriques bien inférieure à la période d'observations pluviométriques. Si le nombre de pluviomètres installés à l'intérieur ou à proximité du bassin est suffisant pour fournir une moyenne « représentative » de la pluie moyenne sur le bassin (peu importe qu'elle lui soit égale ou non, il suffit qu'il existe une corrélation très serrée entre la moyenne calculée avec les pluviomètres et la moyenne réelle), il est possible d'étendre la période de données hydrologiques à la durée des observations pluviométriques par une méthode de corrélations pluies-débits.

D'autre part, les débits caractéristiques de basses eaux, qu'il s'agisse des débits caractéristiques d'étiage (D C E), des débits caractéristiques de 11 mois (D C 11) ou autres, sont en bonne corrélation avec les débits des mois les plus faibles : mois le plus faible pour le D C E, moyenne des deux mois les plus faibles pour le D C 11 etc... Ceci est important car on ne peut introduire de façon simple des corrélations pluies-débits que pour des périodes au moins mensuelles.

Le problème se ramène donc au calcul des débits mensuels de basses eaux à partir des données pluviométriques. On opère de la façon suivante :

1.1 *Calcul de la pluie moyenne sur le bassin, pour chaque mois de la période d'observations.*

Suivant les cas, on prendra une moyenne simple ou pondérée des pluies aux différentes stations, d'après les méthodes classiques. Il y a lieu, toutefois, pour conserver le maximum d'informations, de procéder à une homogénéisation de ces données si les périodes d'observations sont inégales. On verra ce qu'il en est dans le cas de la NAMORORA.

1.2 *Etude du tarissement pur.*

On l'effectue en reportant sur un graphique semi-logarithmique tous les hydrogrammes de « saison sèche » disponibles, les débits étant portés en ordonnées logarithmiques.

Rappelons qu'il s'agit ici d'une « saison sèche » toute relative pendant laquelle on observe des précipitations qui peuvent être importantes. Cependant, il existe en général des périodes sans pluies suffisamment longues pour que le débit d'un bassin de taille réduite atteigne et suive pendant un certain temps la courbe de récession. On sait que si le bassin présente un tarissement homogène, la courbe de récession est de la forme

$$q = q_0 e^{-k(t-t_0)}$$

Le faisceau des hydrogrammes présente donc en coordonnées semi-logarithmiques une série de segments droits ayant tous la même pente. L'analyse de ce faisceau

pour la détermination de la courbe type de tarissement pur caractéristique du bassin s'effectue au moyen d'un réseau de droites parallèles.

1.3 Recherche d'une « charnière » de raccordement entre hautes eaux et basses eaux.

Il s'agit de rechercher une caractéristique de débit que nous appellerons « charnière » et qui puisse servir de départ au tarissement. Ce point se trouve donc sur la courbe de récession et, d'autre part, ne doit pas être trop éloigné de la période de hautes eaux de façon que l'on puisse, par une corrélation serrée, rattacher le débit correspondant aux pluies de cette période.

Pour la NAMORONA à VOHIPARARA, par exemple, nous avons été amenés à considérer un « débit fictif au 1^{er} Juillet » qui sera défini avec plus de précision lors de l'application de la méthode à cette rivière. Ce débit est en excellente corrélation avec le débit moyen de Mai et Juin (coefficient de corrélation : 0,997). On conçoit donc que s'il existe une corrélation entre les débits de Mai et Juin, d'une part, et les pluies mensuelles de ces mois et des mois de hautes eaux, d'autre part, on puisse facilement calculer le débit fictif envisagé à partir des pluies moyennes mensuelles sur le bassin, et ceci pour l'ensemble de la période d'observations pluviométriques.

1.4 Recherche des corrélations pluies-débits pour le calcul de la charnière.

On se propose de déterminer, à partir des seules précipitations, les débits moyens des mois qui sont en excellente corrélation avec la charnière, c'est-à-dire les débits de Mai et de Juin, par exemple, pour la NAMORONA.

Ces deux mois sont relativement proches de la saison de hautes eaux qui se produit principalement de Janvier à Mars sur cette rivière. Les précipitations de cette période ont servi, d'une part, à assurer les débits de ruissellement de toutes natures, d'autre part, à recharger les nappes. La partie infiltrée est loin d'être constante et dépend en grande partie de la hauteur des précipitations. On peut donc prévoir que les pluies de Janvier à Mars auront une influence notable sur les débits de Mai et Juin.

Par contre, l'influence des précipitations tombées entre Mars et le mois considéré ont peu d'influence sur le débit de ce mois : l'étude des observations simultanées de pluies et de débits semblent montrer que les nappes ne se rechargent pas durant cette période, peut-être parce que la végétation se charge d'absorber ce qui n'a pas ruisselé.

Enfin, les précipitations tombées par exemple en Juin participent de façon notable à l'écoulement de ce mois.

Il reste à se fixer un schéma mathématique permettant de représenter numériquement l'influence des différents éléments pluviométriques sur le débit du mois étudié. L'analyse fine des phénomènes à l'échelle d'un bassin d'une certaine étendue est pratiquement inextricable, d'autant plus que les éléments du bilan ne sont connus que globalement. Dans ces conditions, on adoptera le schéma le plus simple se réservant de contrôler, a posteriori, sa validité. Q étant le débit de Mai ou de Juin, P_0 la pluviométrie mensuelle correspondante, P_1 , P_2 et P_3 les pluviométries respectives de Mars, Février et Janvier, on écrira

$$Q = a P_0 + b P_1 + c P_2 + d P_3$$

Les résultats obtenus montrent que dans le cas particulier de la NAMORONA, il n'est pas besoin, pour ces deux mois, d'ajouter une constante. Notons d'ailleurs qu'on n'a pas intérêt à multiplier les paramètres, car si l'ajustement s'améliore en général avec leur nombre, il devient moins significatif. L'ajustement des coefficients est opéré par la méthode des moindres carrés. On obtient une bonne correspondance entre débits mesurés et débits calculés.

1.5 Calcul des débits mensuels de basses eaux

Si l'on part du débit fictif q_0 constituant la charnière et calculé d'après les méthodes exposées ci-dessus, le débit d'un jour de basses eaux se compose :

— du débit de tarissement originel qui peut être déterminé avec une précision assez grande d'après la connaissance de q_0 et de l'intervalle de temps séparant le jour considéré de la date choisie comme point de départ et pour laquelle on a défini un débit fictif.

— du débit de tarissement provenant du renforcement des nappes par les pluies tombées entre la date de la charnière et le jour considéré.

— du débit instantané correspondant à une crue ou une décrue éventuelle en cours le jour considéré.

Si l'on passe des débits journaliers aux débits mensuels, on peut encore se rattacher aux mêmes caractéristiques, en considérant comme débit de tarissement originel celui qui correspond au milieu du mois. L'approximation conduit à des écarts très faibles. C'est ainsi que, pour la NAMORONA, le débit de Septembre peut se mettre sous la forme :

$$Q = Aq_0 + a + bP_1 + cP_2 + dP_3$$

où : q_0 est le débit fictif au 1^{er} Juillet

P_1 la pluie moyenne de Septembre

P_2 » » d'Août

P_3 » » de Juillet

Notons que A n'est pas un coefficient à évaluer; il est connu à partir du moment où l'on connaît la loi de tarissement type du bassin.

On établit ainsi une série de relations permettant, pour chaque mois, de calculer les débits moyens. La corrélation des débits caractéristiques de basses eaux (D C E et D C 11) avec ces débits mensuels, permet de les reconstituer pour toute la période d'observations pluviométriques. On dispose alors d'un échantillon de débits d'étiages beaucoup plus important sur lequel une étude statistique peut être tentée.

2. APPLICATION AU CAS DE LA NAMORONA A VOHIPARARA

La NAMORONA est un petit fleuve de la côte Est de MADAGASCAR. La superficie totale de son bassin est de 1600 km² à l'embouchure; à VOHIPARARA elle n'est que de 380 km². La présente étude a été faite en vue de l'aménagement d'une centrale au fil de l'eau pour lequel on désire connaître, avec le maximum de précision, les débits d'étiage. Les relevés directs ne portent que sur 8 ans environ, alors qu'on peut obtenir, après homogénéisation, 28 ans de valeurs des précipitations. Nous allons suivre, en prenant ce bassin comme exemple, le déroulement des différentes opérations nécessitées par l'application de la méthode précédente.

2.1 Calcul des pluies moyennes sur le bassin

Il n'existe aucun pluviomètre suivi à l'intérieur même du bassin, mais ce dernier est entouré par trois postes officiels observés pendant des périodes inégales (fig. 1) :

— AMBOHIMAHASOA au Nord-Ouest, non loin de la ligne de partage des eaux (10 km environ). Le début des observations remonte à 1935.

— FIANARANTSOA au Sud-Ouest, à 35 km des limites du bassin. La station a été créée en 1902, mais il existe un certain nombre de lacunes.

— IFANADIANA à l'Est, à 25 km du bassin. Les observations ont commencé en 1912, mais ne sont suivies de façon continue que depuis 1931.

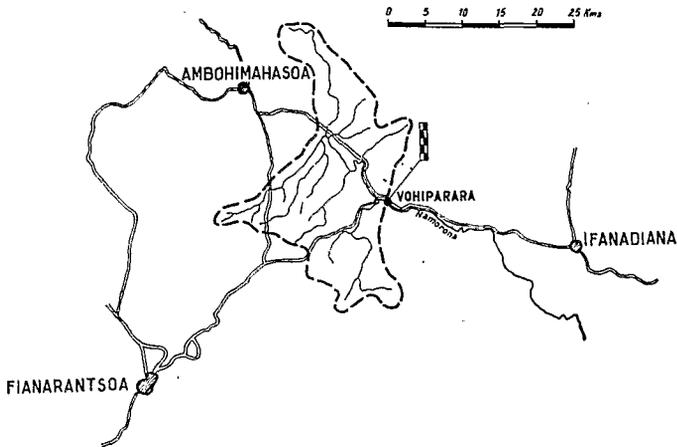


Fig. 1 — Bassin versant de la Namorona à Vohiparara.

Ces trois postes ont des modules pluviométriques très différents, mais il existe entre eux une corrélation certaine. Pour « homogénéiser » les observations et les étendre pour les trois postes à la période 1931-1939, on a étudié la corrélation entre :

x_1 (moyenne mensuelle FIANARANTSOA-IFANADIANA) et y (moyenne mensuelle des trois stations), d'une part :

Coefficient de corrélation : 0,97

Régression de y en x_1 : $y = 137 + 0,865 (x_1 - 155)$

x_2 (moyenne mensuelle IFANADIANA-AMBOHIMAHASOA) et y , d'autre part :

Coefficient de corrélation : 0,96

Régression de y en x_2 : $y = 137 + 0,794 (x_2 - 156)$

En effet, dans l'ignorance où l'on se trouve des coefficients de pondération à effectuer à chaque poste (la méthode de THIESSEN ne paraît pas convenir), nous nous sommes contentés de moyennes arithmétiques simples.

x_3 représente une pluie moyenne mensuelle AMBOHIMAHASOA-FIANARANTSOA. Nous n'avons pas calculé son coefficient de corrélation mais il doit être voisin des deux premiers.

On a adopté, en définitive, les relations suivantes : $y = 0,87x_1$, $y = 0,80x_2$, $y = 1,31x_3$, qui permettent de reconstituer les moyennes des mois pour lesquels manquent les relevés d'une des trois stations.

2.2 Etude du tarissement pur

On a reporté sur la figure 2 un faisceau simplifié des hydrogrammes de basses eaux observés à la station hydrométrique. Les débits sont portés en ordonnées logarithmiques. L'analyse de ce faisceau conduit à deux courbes extrêmes de tarissement pur dont les constantes de temps sont respectivement de 0,016 et 0,014, les temps étant exprimés en jours. Ces valeurs sont assez voisines pour que l'on puisse se contenter d'une seule courbe type avec une constante de temps de 0,015. Le débit de tarissement pur au jour t sera donné en fonction du débit q_0 au jour zéro par la formule:

$$q = q_0 e^{-0,015 t}$$

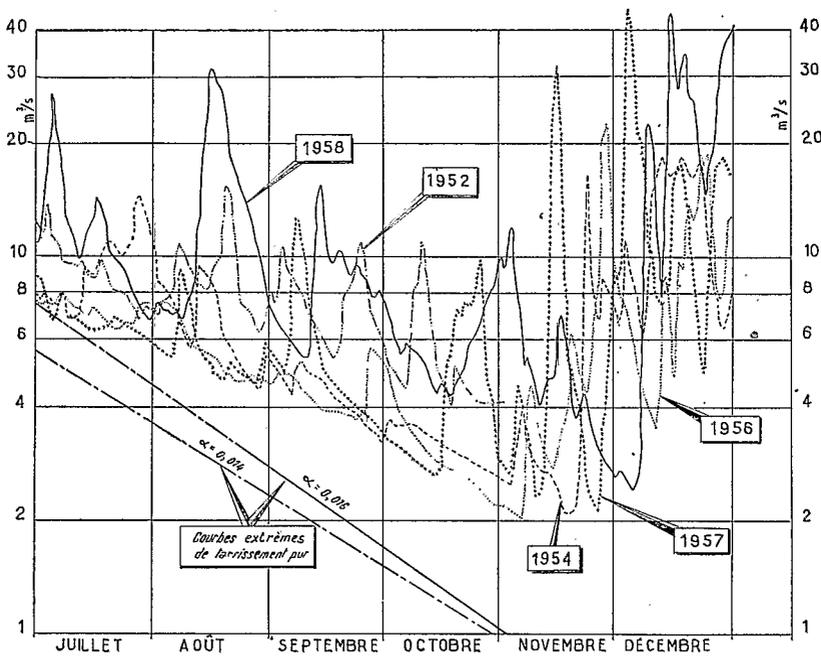


Fig. 2 — Namorona à Vohiparara. Hydrogrammes de basses eaux

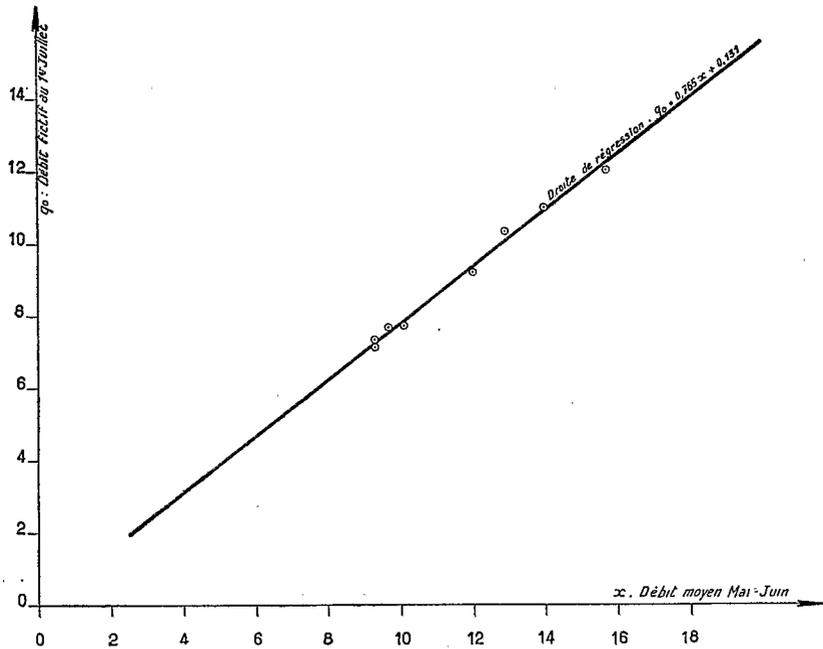


Fig. 3 — Namorona à Vohiparara. Corrélation entre le débit fictif du 1^{er} juillet et le débit moyen des mois de mai et juin.

2.3 Caractéristiques de la « charnière »

Pour la NAMORONA, cette charnière peut être constituée par un débit fictif au 1^{er} Juillet défini comme le point se trouvant au 1^{er} Juillet sur la courbe de tarissement. Pour sa détermination, à partir des hydrogrammes connus, deux cas peuvent se produire :

— Le débit du 1^{er} Juillet est effectivement sur la courbe de tarissement : on prend le débit réellement observé.

— On observe le 1^{er} Juillet une crue parasite et le point correspondant est supérieur au débit de tarissement : on cherche alors le minimum le plus proche dont on adopte la valeur comme débit fictif après s'être assuré qu'il correspond bien à un débit de tarissement. Pour la NAMORONA, on a trouvé très facilement de tels minimums, sans que l'écart de temps soit supérieur à 2 ou 3 jours, ce qui évite toute correction de tarissement.

Ce débit fictif est en étroite corrélation linéaire avec la moyenne des débits de Mai et Juin, ainsi que le montre le graphique de la figure 3. Le coefficient de corrélation est de 0,997 et l'estimation de q_0 (débit fictif au 1^{er} Juillet) par x (débit moyen Mai-Juin) est donnée par la relation :

$$q_0 = 0,765x + 0,131$$

2.4 Calcul des débits de Mai et de Juin

Le débit moyen de chacun de ces mois peut s'exprimer uniquement en fonction des pluies par une relation linéaire. On a obtenu, après ajustement des coefficients :

Pour Mai : $Q \text{ m}^3/\text{s} = 0,0073 P_0 + 0,0181 P_1 + 0,0014 P_2 + 0,0128 P_3$

Pour Juin : $Q \text{ m}^3/\text{s} = 0,045 P_0 + 0,0121 P_1 + 0,0038 P_2 + 0,0093 P_3$

La première relation est établie avec un écart type d'estimation de 0,98 m³/s pour l'échantillon considéré alors que l'écart type caractérisant la dispersion propre à cet échantillon est de 3,03 m³/s. Pour la seconde relation, on obtient respectivement 0,87 m³/s et 2,21 m³/s. La précision est acceptable.

2.5 Calcul des débits mensuels de basses eaux

Il s'agit des débits moyens de Juillet à Décembre, les débits les plus faibles se produisant principalement en Octobre et Novembre.

L'influence du débit de tarissement pur à partir du débit fictif du 1^{er} Juillet se fait sentir jusqu'à Novembre où il atteint des valeurs déjà faibles. En prenant comme point de repère le milieu de chaque mois, on obtient, en fonction de q_0 les débits de tarissement suivants (en m³/s) :

Juillet	: 0,80 q_0
Août	: 0,49 q_0
Septembre	: 0,29 q_0
Octobre	: 0,20 q_0
Novembre	: 0,11 q_0

L'ajustement par les moindres carrés d'une relation linéaire donne, pour chaque mois de cette période, les estimations suivantes :

Juillet : $Q \text{ m}^3/\text{s} = 0,80 q_0 + 0,0621 P$
 P : pluie de Juillet en mm

Août : $Q \text{ m}^3/\text{s} = 0,49 q_0 - 1,7 + 0,125 P_1 + 0,052 P_2$
 P_1 : pluie d'Août (en mm)
 P_2 : pluie de Juillet

- Septembre : $Q \text{ m}^3/\text{s} = 0,29 q_0 - 0,55 + 0,031 P_1 + 0,077 P_2 + 0,012 P_3$
 P_1 : pluie de Septembre (en mm)
 P_2 : pluie d'Août
 P_3 : pluie de Juillet
- Octobre : $Q \text{ m}^3/\text{s} = 0,20 q_0 - 0,1 + 0,042 P_1 + 0,050 P_2$
 P_1 : pluie d'Octobre (mm)
 P_2 : moyenne des pluies de Juillet à Septembre
- Novembre : $Q \text{ m}^3/\text{s} = 0,11 q_0 - 1,6 + 0,055 P_1 + 0,017 P_2 + 0,018 P_3$
 P_1 : pluie de Novembre
 P_2 : pluie d'Octobre
 P_3 : moyenne des pluies de Juillet à Septembre

Pour chaque année, q_0 se calcule à partir des débits moyens des mois de Mai et Juin.

En Décembre, on trouve que les débits ne dépendent pratiquement que de la pluie du mois suivant une relation linéaire :

$$Q \text{ m}^3/\text{s} = -6,3 + 0,073 P$$

Toutefois, cette relation n'est pas valable si les débits sont trop faibles. Il faut alors recourir à une représentation d'allure parabolique. La suppression pure et simple de la constante lors de l'ajustement conduirait à une estimation trop grossière et par excès.

Les résultats obtenus à partir de ces formules ne prétendent pas, évidemment, représenter exactement les véritables débits moyens que l'on aurait pu mesurer pendant les différents mois des années de la période de 28 ans sur laquelle portent les données pluviométriques. Parmi les principaux facteurs de dispersion, on notera :

- La variabilité des facteurs secondaires : température et humidité notamment.
- La distribution de la pluie dans le temps : notamment, une forte pluie tombée à la fin d'un mois donné intéressera surtout les débits du mois suivant. D'autre part, des pluies étalées donneront un écoulement plus faible que des pluies concentrées.
- Le schéma trop simpliste utilisé lorsqu'on pose le principe que la pluviométrie moyenne du bassin est représentée par la moyenne de trois pluviomètres situés à une certaine distance.

Malgré cela, la dispersion reste faible autour de la courbe moyenne et très nettement inférieure, dans le rapport 1/3 en général, à la dispersion propre du phénomène dans le temps. On pourra nous reprocher d'avoir parfait artificiellement les ajustements en introduisant un trop grand nombre de paramètres. En fait, nous avons opéré ainsi parce qu'il nous semble logique a priori que les pluies des différents mois précédant le mois étudié n'aient pas toutes la même influence sur le débit de ce mois, et que le meilleur moyen de préciser ces influences différentes est encore la méthode des moindres carrés. Mais la confiance que l'on peut attribuer aux corrélations a été estimée d'après un schéma beaucoup plus simple dans lequel n'interviennent que deux paramètres.

On peut donc dans l'ensemble estimer que ces résultats sont utilisables pour étudier, de façon plus sûre qu'avec les seules observations directes, la variabilité des débits de basses eaux. Nous ne donnons pas le tableau des résultats afin d'alléger cet exposé.

2.6 Corrélation entre D C E, D C 11 et débits mensuels de basses eaux — Extension des résultats pour ces débits caractéristiques

Nous avons dit précédemment que le D C E est lié au débit du mois le plus faible. La figure 4 montre que la distribution des points suggère une corrélation linéaire.

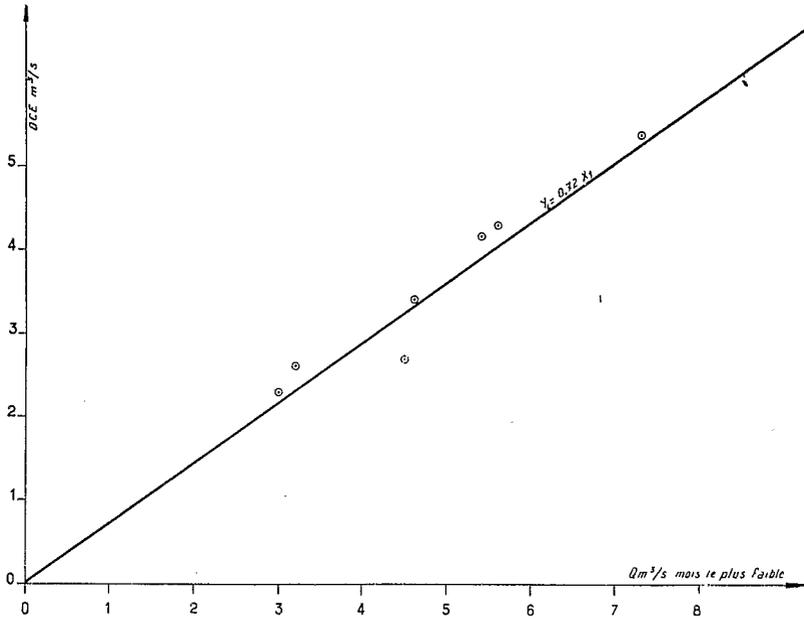


Fig. 4 — Namorona à Vohiparara. Corrélation entre le mois le plus faible et le D.C.E.

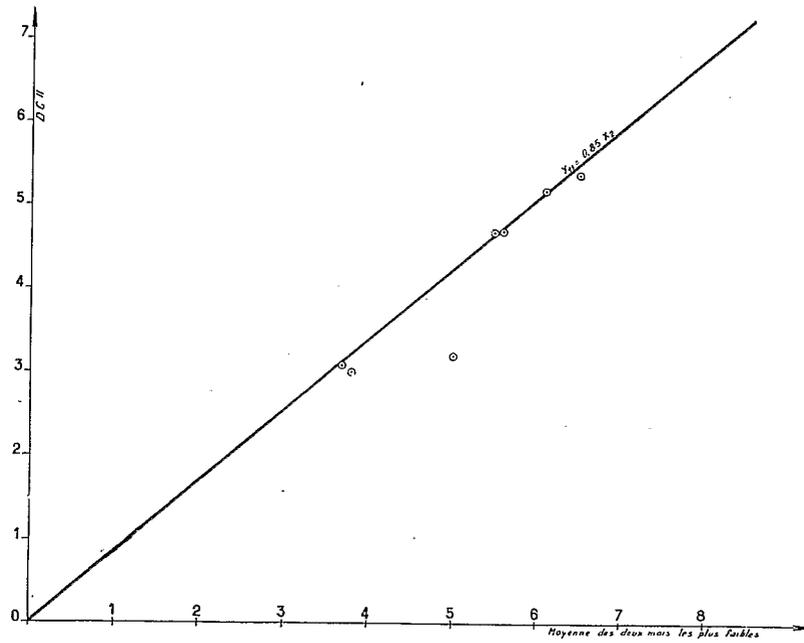


Fig. 5 — Namorona à Vohiparara. Corrélation entre les deux mois les plus faibles et les D C 11

Pour l'ajustement, il nous a semblé logique de faire passer la droite de régression par l'origine. On obtient :

Pour le D C E : $Y_E = 0,72 X_1$

Y_1 = débit moyen du mois le plus faible

Pour le D C 11 : $Y_{11} = 0,72$ (figure 5)

X_2 = débit moyen des deux mois les plus faibles.

On remarquera que 6 des points sur 8 ont une dispersion qui ne dépasse pas l'erreur que l'on pourrait faire en mesurant directement les débits.

Les résultats finaux sont consignés sur le Tableau I. Ces résultats constituent un échantillon que l'on peut commencer à traiter par les méthodes statistiques courantes. Nous noterons simplement qu'à première vue, on n'observe pas de « séries noires » analogues à celles qu'on rencontre dans certaines régions tropicales ou équatoriales : l'échantillon semble distribué au hasard d'après une loi unimodale. Par ailleurs, le calcul met en évidence la probabilité non négligeable de certaines valeurs très faibles (par exemple en 1943) dont on n'aurait pas pu soupçonner l'existence au seul vu des données d'observation directe des débits. Ces résultats sont d'importance primordiale pour l'équipement projeté, même si leur précision est toute relative.

TABLEAU I

Namorona — DCE et DC 11

Année	DCE	DC 11	Année	DCE	DC 11
1959	4,3	5,2	1938	2,2	2,6
1958	2,9	4,7	1937	4,5	5,4
1957	2,7	3,2	1936	3,5	4,6
1956	2,3	3,0	1935	3,9	5,2
1955	2,6	3,1	1934	3,2	4,9
1954	3,4	4,7	1933	2,2	3,6
1953	5,4	7,3	1932	2,9	3,4
1952	4,2	5,4	1931	3,0	4,1
1951	4,1	5,1			
1950	4,5	6,0			
1949	3,1	3,7			
1948	2,9	5,0			
1947	3,7	5,3			
1946	4,2	5,8			
1945	3,5	4,3			
1944	3,7	4,7			
1943	1,2	2,2			
1942	3,6	5,1			
1941	2,7	3,8			
1940	4,5	5,7			
1939	5,3	6,6			

Marcel ROCHE
Ingénieur à Electricité de France

**METHODE D'ESTIMATION DES DEBITS D'ETIAGE
DE FAIBLE FREQUENCE — APPLICATION A UNE
RIVIERE DE MADAGASCAR**

EXTRAIT DE LA PUBLICATION N° 51

HELSINKI 1960

ASSOCIATION INTERNATIONALE D'HYDROLOGIE SCIENTIFIQUE

B 12648