

REPUBLIQUE FRANCAISE

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE DE TANANARIVE

SECTION HYDROLOGIE

m
DOCUMENTATION

ANALYSE

*Attendre
rapport Simonin*
*P. Pourrut
c/c. P. Pouché*
V. M. P.

RELATION DIRECTE ENTRE L'EVAPOTRANSPIRATION
REELLE ET LA HAUTEUR DES PRECIPITATIONS
CALCUL ETABLI POUR DE COURTES PERIODES
EN SAISON PLUVIEUSE

par

Pierre POURRUT

ORSTOM
HYDROLOGIE
DOCUMENTATION

71260

MARS 1971.

27 JUL 1971

ORSTOM.
Fonds Documentaire

ORSTOM Fonds Documentaire

N° :

14132

Cote :

B

Depuis de nombreuses années les hydrologues se sont attachés à l'étude des eaux de surface sur bassins versants représentatifs et peuvent, avec une marge d'erreur très restreinte, déterminer la part du ruissellement en se basant uniquement sur les données pluviométriques. Un des objectifs, au cours de ces dernières années, est l'établissement de bilans hydriques complets sur de courtes périodes, le but final étant comme il est fait actuellement pour le ruissellement, de pouvoir déterminer la recharge naturelle de la nappe uniquement à partir des précipitations.

Les paramètres connus sont les suivants : hauteurs pluviométriques, ruissellement, écoulement de base et variations du niveau piézométrique. Les facteurs inconnus ou mal connus sont : le stockage dans la zone non saturée et les pertes par évapotranspiration. L'utilisation récente de l'humidimètre à neutrons a contribué nettement à l'amélioration des connaissances dans ces domaines surtout pendant les périodes sèches ou de faible pluviosité (a et b). Pendant les saisons pluvieuses et surtout en zone tropicale où les pluies sont intenses et fréquentes le problème est plus complexe ; d'une part parce que les apports sont fractionnés dans le temps, d'autre part parce que les quantités d'eau en mouvement dans la zone non saturée, soit vers la nappe soit pour être reprises par l'évapotranspiration, sont très importantes. De plus l'humidimètre à neutrons, bien que mesurant les variations d'humidité sur un profil donné ne peut en aucun cas, et ce n'est pas son rôle, donner d'indication ayant transité pendant l'intervalle de temps qui sépare deux profils successifs (sur le volume d'eau.)

La présente note constitue une première approche, en saison des pluies et pour de courtes périodes voisines de 15 jours :

- de l'établissement de bilans hydriques complets,
- de la détermination des valeurs de l'évapotranspiration réelle uniquement à partir des précipitations.

Naturellement le problème est loin d'être résolu et ces résultats

../...

sont trop récents pour que les conclusions actuelles revêtent un aspect qui ne soit pas provisoire ; elles demandent à être confirmées par une expérimentation plus poussée, tant sur le lieu même de ces expériences que dans d'autres territoires, sur des sols et sous des climats différents.

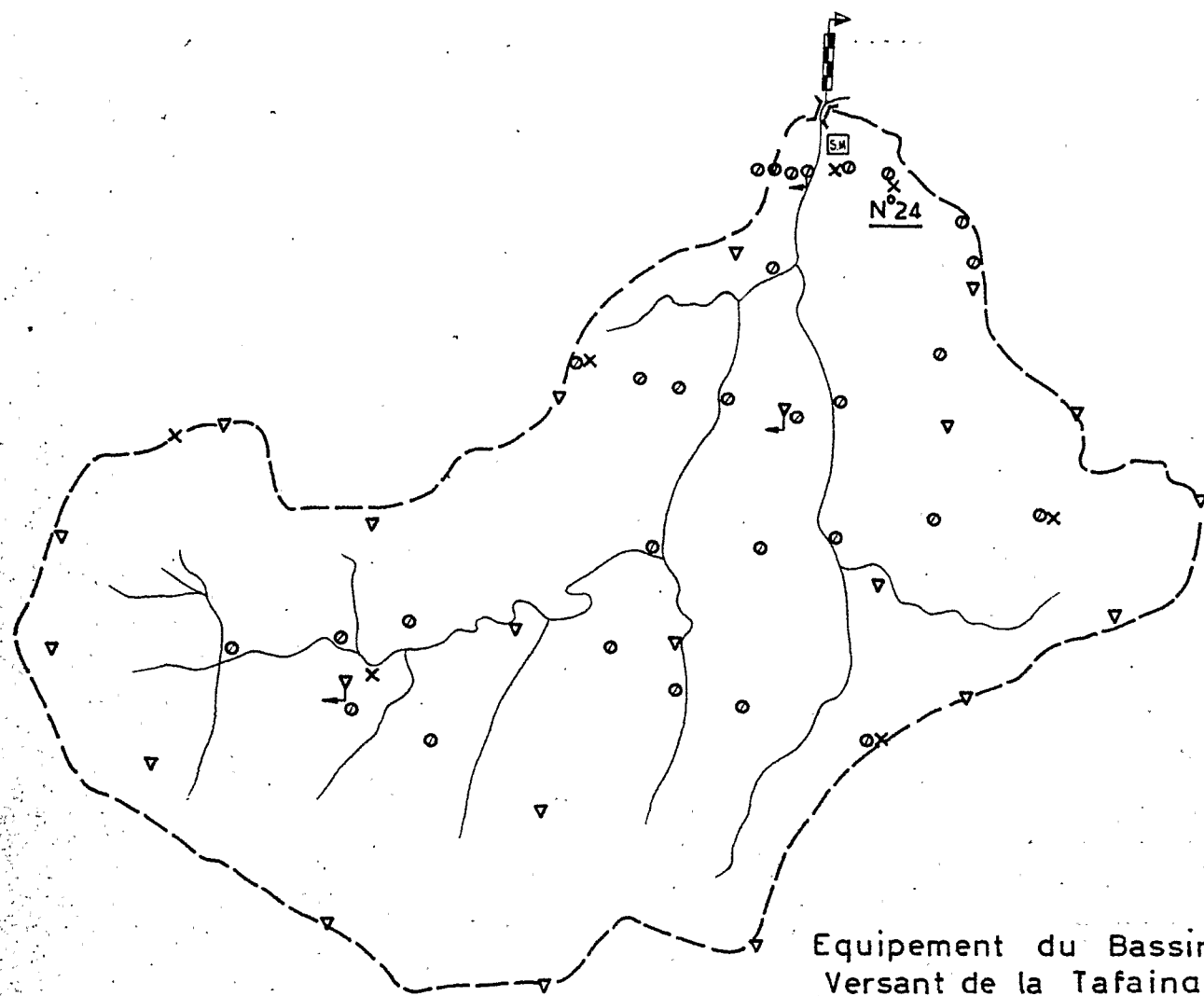
I/ - SITUATION DE L'ETUDE ET MOYENS MIS EN OEUVRE.-

Cette étude a été entreprise sur le Bassin Versant représentatif de la TAFAINA. Ce bassin d'une superficie de 4,5 Km² est situé sur les Hauts Plateaux malgaches à environ 40 Km au Sud de TANANARIVE. Etudié depuis 1962 ce bassin possède un équipement hydro-pluviométrique complet comprenant :









- 24 pluviomètres et pluviographes
- 29 piézomètres et piézographes
- une station de mesures à l'exutoire, équipée d'un seuil deversant et d'un limnigraphe
- une station météorologique avec évaporographes et cuves d'évapotranspiration
- deux parcelles de ruissellement de 100 m²

Depuis 1966 de nombreux tubages pour sonde à neutrons, provisoires ou définitifs suivant leurs fonctions, ont également été mis en place. Actuellement le réseau comporte sept points de mesures qui sont exploités, dans la mesure du possible, deux fois par semaine en saison des pluies et deux fois par mois en saison sèche. Un de ces tubages (n° 24), installé en Janvier 1969 atteint la profondeur de 8,50 mètres et plonge dans l'aquifère puisque le niveau piézométrique à cet endroit varie entre 7,50 m et 5,50 m mesurés à partir de la surface par un piézomètre situé à 2 mètres du tubage. L'appareillage de mesures neutroniques généralement prêté par le laboratoire des Radio-Isotopes de TANANARIVE, a été jusqu'en Octobre 1969 un ensemble HP et IP 110 et à partir de cette date un ensemble HP et EC 310. Ces appareils ont été construits par la

.. / ...



Équipement du Bassin
Versant de la Tafaina

-  Station météo - Parcelles de ruissellement
-  Pluviomètre
-  Pluviographe
-  Piézomètre
-  Piézographe
-  Tubage sonde à neutrons
-  Limnigraphe
-  Seuil deversant

Echelle : 1/20.000

CSF (1) sous système CEA (2).

II/ - DEFINITION DE L'ETUDE.-

Pour une période de 120 jours comprise entre le 28 Octobre 1970 et le 25 Février 1971, et à partir des données en notre possession c'est à dire :

- écoulement au seuil de mesures du bassin
- ruissellement aux parcelles
- variations de la nappe aux piézomètres
- hauteurs pluviométriques
- 23 profils hydriques établis au tubage n° 24

nous nous proposons d'établir des bilans hydriques complets sur des périodes voisines de 15 jours avec, pour objectif final, l'établissement d'une formule permettant, pour des intervalles de temps de cet ordre, de calculer l'évapotranspiration réelle en se basant uniquement sur les données pluviométriques.

avec ruissellement au seuil de l'écoulement au seuil de la zone non saturée.

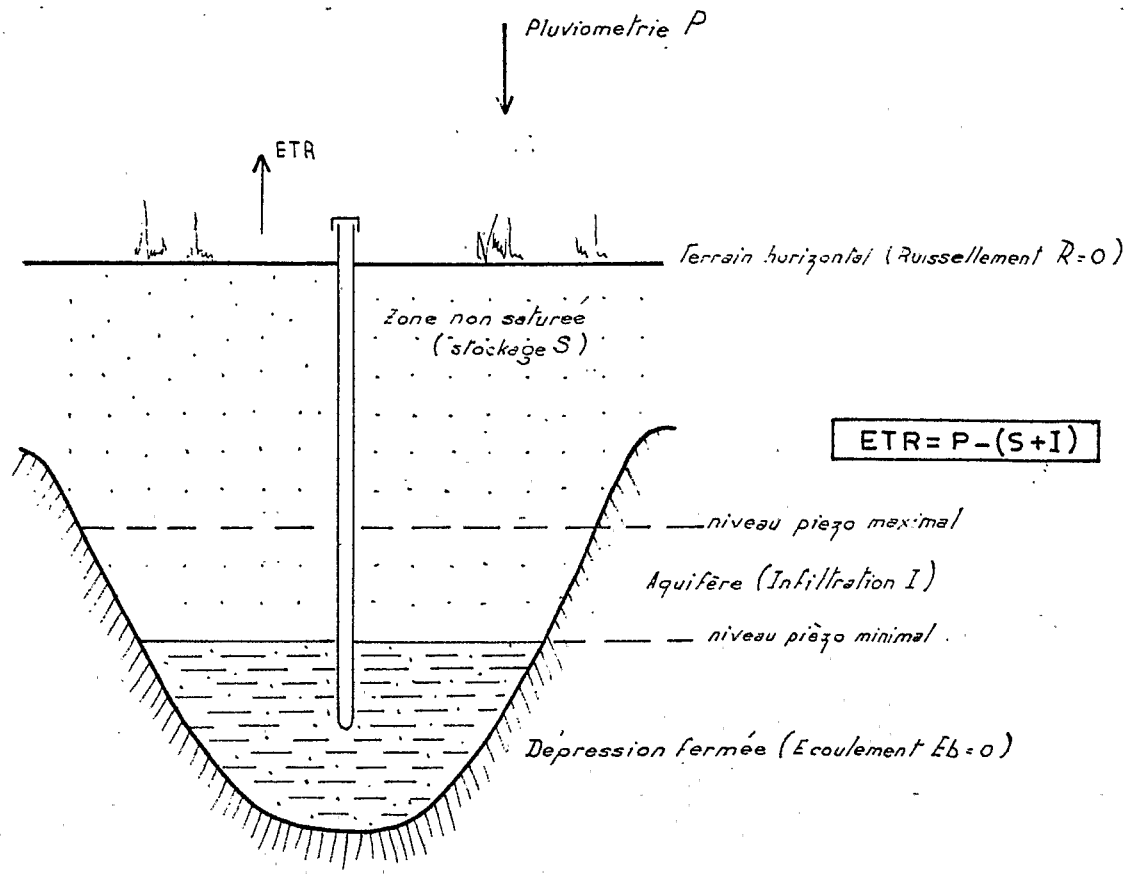
Supposons un terrain parfaitement horizontal en surface et, en profondeur, un substratum impénétrable délimitant une dépression renfermant une nappe aquifère (fig 2 a). Entre l'instant t_1 et l'instant t_2 correspondants aux profils hydriques 1 et 2, le bilan est résumé par l'égalité suivante :

$$P = S + I + ETR$$

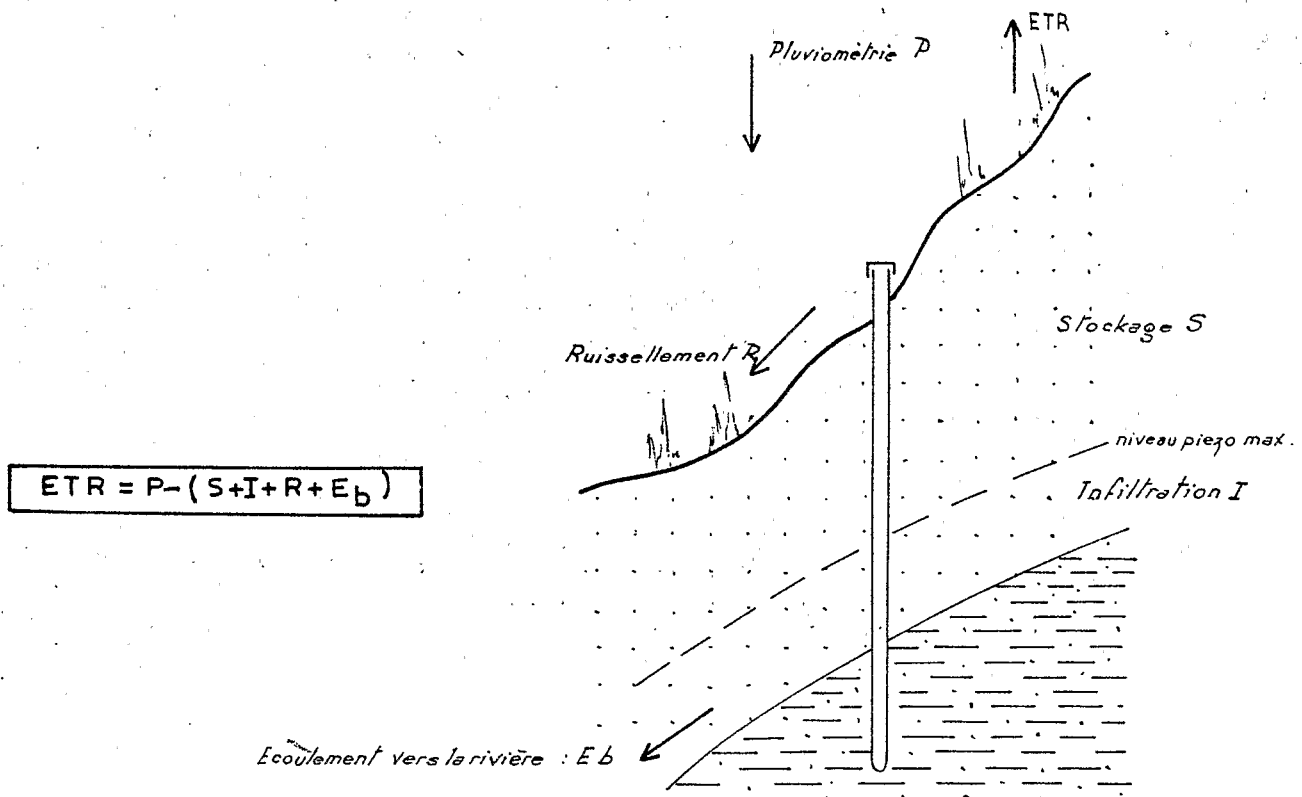
où P est la hauteur totale des précipitations
 S est le stockage dans la zone non saturée, différence entre les profils hydriques 1 et 2 ; notons que S peut être négatif (dessèchement).

- (1) C E T H - C S F : Compagnie Française Thomson Houston - Compagnie Générale de Télégraphie sans fil.
- (2) C E A : Commissariat Français à l'Energie Atomique.

.../...



a) Conditions optimales



b) Conditions générales

*calculée
de la
nappe*

I est la quantité d'eau infiltrée effectivement arrivée à la nappe ; notons que I peut être également négatif (baisse du niveau piézométrique) ; notons aussi que la lame d'eau correspondante est calculée en faisant le produit de la variation du niveau piézométrique en mm et de la porosité efficace (qui détermine le volume d'eau gravifique) cette dernière étant de l'ordre de 15 % dans le cas du bassin de la TAFAINA.

ETR est l'évapotranspiration réelle, qui regroupe l'évaporation directe sur sol nu, l'interception par le feuillage et l'utilisation par les plantes.

*Il y a donc
surveillance
avec*

Dans la majorité des cas cependant ce bilan simplifié est compliqué par les réalités suivantes : le terrain n'est pas horizontal et la nappe souterraine est mobile et alimente une rivière (fig 2 b). Les deux paramètres supplémentaires sont donc :

R qui est le ruissellement de surface
et Eb qui est la participation de cette partie de la nappe à l'écoulement de base de la rivière.

Le bilan général s'écrit alors :

$$P = S + I + R + Eb + ETR$$
$$\text{soit } ETR = P - (S + I + R + Eb)$$

III/ - CALCUL DES BILANS HYDRIQUES ET FORMULE D'EVAPOTRANSPIRATION REELLE.

On trouvera au tableau n° 1 la liste des mesures brutes, en impulsions/seconde, effectuées sur le tubage 24.

Le tableau n° 2 résume l'évolution, en mm d'eau, du profil n° 24 entre le 28 Octobre 1970 et le 25 Février 1971. La méthode employée est la méthode classique qui consiste à faire la somme, en impulsions/seconde, des valeurs relevées aux points de mesures pondérées par la tranche de sol intéressée, puis de faire le produit de cette somme et de la pente de la droite d'étalonnage (c). Cette pente est égale

../...

TABLEAU n° 1

TUBAGE 24 - MESURES BRUTES EN IMPULSIONS/SECONDE

Profond. cm \ Date	28.10	11.11	20.11	24.11	27.11	2.12	7.12	11.12	15.12	18.12	21.12	24.12
20	118	164	151	155	162	166	163	161	150	146	157	152
30	166	201	193	190	201	203	197	196	193	188	194	193
50	223	235	234	235	241	239	238	236	231	236	237	238
70	212	215	209	210	216	219	216	223	215	217	217	222
90	190	183	185	190	187	193	190	191	191	193	190	193
110	195	199	195	202	201	203	206	199	203	202	202	201
150	202	210	203	202	196	198	197	198	199	198	206	200
210	224	224	224	224	222	226	221	223	223	223	226	229
250	239	252	243	243	243	241	245	244	243	245	247	246
310	238	242	254	257	260	260	257	255	260	260	258	262
360	261	238	261	262	254	261	258	254	255	258	260	262
410	255	263	262	260	262	261	260	262	259	259	264	263
450	250	260	264	255	256	256	256	253	258	258	260	260
510	232	243	251	253	259	261	252	253	250	256	255	258
560	270	236	272	266	273	271	269	272	270	269	273	270
610	279	266	260	259	264	264	263	261	261	264	264	262
650	299	280	295	297	288	293	296	294	295	295	295	295
710		299	300	300	299	304	299	299	299	304	300	305

Profond. cm \ Date	29.12	31.12	4.1.71	8.1	14.1	18.1	29.1	16.2	19.2	22.2	25.2
20	176	179	182	177	159	158	179	173	175	171	175
30	215	219	223	214	197	196	224	215	214	213	215
50	249	252	250	247	241	237	250	248	244	249	244
70	222	226	226	227	224	218	231	226	223	228	221
90	195	202	210	209	203	203	221	214	207	215	207
110	202	209	208	208	210	206	217	211	216	217	207
150	202	205	208	212	203	212	222	217	216	213	211
210	221	228	221	228	228	233	237	239	239	239	238
250	245	247	245	249	247	248	252	249	257	257	256
310	258	261	261	261	264	259	264	268	272	269	269
360	264	262	261	261	269	260	262	265	264	262	263
410	259	263	261	264	267	261	263	267	266	263	270
450	259	263	259	257	265	259	264	262	262	266	264
510	258	257	256	258	261	259	263	256	263	264	263
560	270	271	270	276	277	273	273	278	276	278	274
610	263	266	262	265	270	265	268	275	280	288	294
650	288	299	299	294	295	297	297	305	299	304	305
710	303	305	302	303	303	307	303	297	294	302	303

TABLÉAU n)2

EVOLUTION DU PROFIL POUR DIFFÉRENTES TRANCHES

DE SOL AU TUBAGE n) 24

Dates	28.10	11.11	20.11	24.11	27.11	2.12	7.12	11.12	15.12	18.12	21.12	24.12	
P mm		97,4	27,0	9,8	25,1	21,0	5,7	12,0	0	2,5	37,8	0,3	
1,35 m	$\Sigma 1$	121,4	134,0	127,7	129,8	132,2	133,9	132,9	132,0	129,8	129,6	131,2	131,3
	$\Delta \leq 1$		+9,6	-3,3	+2,1	+2,4	+1,7	-1,0	-0,9	-2,2	-0,2	+1,6	+0,1
2,85 m	$\Sigma 2$	284,3	299,1	291,8	293,8	294,1	296,8	295,3	294,9	292,7	292,8	297,6	296,6
	$\Delta \leq 2$		+14,8	-7,3	+2,0	+0,3	+2,7	-1,5	-0,4	-2,2	+0,1	+4,8	-1,0
6,35 m	$\Sigma 3$	721,6	727,4	738,7	737,7	742,0	746,1	740,0	738,3	735,7	739,7	746,9	746,7
	$\Delta \leq 3$		+5,8	+11,3	-1,0	+4,3	+4,1	-6,1	-1,7	-2,6	+4,0	+7,2	-0,2
Profondeur de la nappe	7,00	6,98	6,96	6,96	6,95	6,95	6,96	6,95	6,95	6,95	6,96	6,95	
Ruissellement à la parcelle		2,9	0,9	0	0	0	0	0	0	0	3,8	0,9	

Dates	29.12	31.12	4.1.7	8.1	14.1	18.1	29.1	16.2	19.2	22.2	25.2	
P mm	84,6	22,2	57,5	20,0	9,0	0	219,5	396,4	8,1	37,0	44,1	
1,35 m	$\Sigma 1$	137,3	140,5	141,6	140,1	135,4	133,6	144,4	140,6	140,3	141,6	138,6
	$\Delta \leq 1$		+6,0	+3,2	+1,1	-1,5	-4,7	-1,8	+10,8	-3,8	-0,3	+1,3
2,85 m	$\Sigma 2$	300,9	307,1	306,7	308,8	301,5	303,4	318,6	312,3	314,7	315,3	311,3
	$\Delta \leq 2$		+4,3	+6,2	-0,4	+2,1	+7,3	+1,9	+15,2	-5,3	+1,4	+0,6
6,35 m	$\Sigma 3$	749,5	758,6	755,1	760,1	760,4	753,2	773,6	771,7	776,0	778,4	776,0
	$\Delta \leq 3$		+2,8	+9,1	-3,5	+5,0	+0,3	-7,2	+20,4	-1,9	+4,3	+2,4
Profondeur de la nappe	6,96	6,95	6,92	6,86	6,78	6,79	6,58	6,25	6,21	6,21	6,20	
Ruissellement à la parcelle	2,3	0	2,0	0	0,3	0	22,5	39,1	0	0,6	0,8	

dans le cas présent à 0,49. On remarquera que l'évolution du profil a été établie par trois tranches de sol d'épaisseur différente : 1,35 m (\sum_1), 2,85 m (\sum_2) et 6,35 m (\sum_3). Nos calculs seront, bien entendu basés sur $\Delta \sum_3$ mais nous voulions voir quelle était l'erreur introduite en utilisant une tranche de sol plus faible. Sur la totalité de la période les mises en réserve ont été de :

17,2 mm	sur	1,35 m
27,0 mm	sur	2,85 m
54,4 mm	sur	6,35 m

Ces valeurs entraînent les erreurs suivantes :

pour 1,35 m : $\frac{17,2 \times 6,35}{1,35} = 80,9$ mm
soit un excès de 26,5 mm
ou 49 %

pour 2,85 m : $\frac{27,0 \times 6,35}{2,85} = 60,2$ mm
soit un excès de 5,8 mm
ou 11 %.

Le rôle de la profondeur de tubage est donc très important et d'autant plus capital que la période considérée est courte. C'est ainsi que si on examine les profils successifs du tableau n° 2 on s'aperçoit des erreurs énormes qui peuvent être commises : un dessèchement en surface par exemple, peut très bien coexister avec un gain sur l'ensemble du profil, comme c'est le cas pour les mesures effectuées entre le 11 et le 20 Novembre 1970.

Le tableau n° 3 résume les termes du bilan pour les périodes considérées, celles-ci variant de 9 jours au minimum à 18 jours au maximum. Nous avons, dans la première partie de ce tableau, établi le bilan en utilisant l'écoulement global à l'exutoire du bassin $E_g = E_b + R$.

Les résultats obtenus, quoique encourageants, laissent apparaître une incertitude assez élevée surtout pour les forts totaux pluviométriques.

../...

TABLEAU n° 3

TERMES DU BILAN POUR DES PERIODES VOISINES DE 15 JOURS

PERIODE	sans correction de ruisselle		Avec correction de ruisselle	
	Paramètres en mm	ETR en mm	Paramètres en mm	ETR en mm
28.10 au 11.11.70 (14 jours)	P 97,4 I 3,0 S +5,8 Eg 14,7	global 73,9 par jour 5,3	P 97,4 I 3,0 S +5,8 Eb 9,9 R 2,9	global 75,8 par jour 5,4
11.11 au 24.11.70 (13 jours)	P 36,8 I 3,0 S +10,3 Eg 9,5	global 14,0 par jour 1,1	P 36,8 I 3,0 S +10,3 Eb 9,5 R 0,9	global 13,1 par jour 1,0
24.11 au 7.12.70 (13 jours)	P 51,8 I 1,5 S +2,3 Eg 10,9	global 37,1 par jour 2,8	P 51,8 I 1,5 S +2,3 Eb 10,9 R 0	global 37,1 par jour 2,8
7.12 au 21.12.70 (14 jours)	P 52,3 I 1,5 S +6,9 Eg 13,6	global 30,3 par jour 2,2	P 52,3 I 1,5 S +6,9 Eb 9,6 R 3,8	global 30,5 par jour 2,2
21.12 au 4. 1.71 (14 jours)	P 164,6 I 7,5 S +8,2 Eg 35,1	global 113,8 par jour 8,1	P 164,6 I 7,5 S 8,2 Eb 23,7 R 9,0	global 116,2 par jour 8,3
4. 1 au 18. 1.71 (14 jours)	P 29,0 I 19,5 S -1,9 Eg 15,9	global -4,5 par jour -0,3	P 29,0 I 19,5 S -1,9 Eb 15,0 R 0,3	global -3,9 par jour -0,3
18. 1 au 29. 1.71 (11 jours)	P 219,5 I 36,0 S +20,4 Eg 71,7	global 91,4 par jour 8,3	P 219,5 I 36,0 S +20,4 Eb 36,1 R 22,5	global 104,5 par jour 9,5
29. 1 au 16. 2.71 (18 jours)	P 346,4 I 49,5 S -1,9 Eg 155,9	global 142,9 par jour	P 346,4 I 49,5 S -1,9 Eb 70,1 R 39,1	global 189,6 par jour 10,5
16. 2 au 25. 2.71 (9 jours)	P 89,2 I 7,5 S +4,3 Eg 40,9	global 36,5 par jour 4,1	P 89,2 I 7,5 S 4,3 Eb 30,5 R 1,4	global 45,5 par jour 5,1

Nous avons pensé que celle-ci pouvait provenir en partie de l'hétérogénéité des précipitations sur le bassin et du fait que le ruissellement observé au seuil déversant pouvait être différent du ruissellement réel existant aux alentours du tubage n° 24. Aussi, dans la deuxième partie du tableau n° 3, nous avons utilisé les résultats du ruissellement obtenus sur la parcelle n° 1, éloignée d'à peine 150 mètres, de pente, de sol et de végétation semblables. Nous avons conservé, ne pouvant faire autrement, les valeurs de E_p à l'exutoire en posant comme postulat que chaque point de la nappe contribue de façon égale à l'alimentation du débit de base. Ce n'est vraisemblablement pas tout à fait exact mais nous ne pensons pas que cela puisse introduire une erreur très forte. De toutes façons, les résultats paraissent excellents et les points obtenus se placent sur une courbe qui semble tendre vers une valeur limite pour les très forts totaux pluviométriques (fig 3). Ces points, placés sur un graphique semi-logarithmique, témoignent également du fait que la croissance de l'évapotranspiration journalière en fonction de la pluviométrie diminue de façon exponentielle puisqu'ils s'alignent correctement suivant une droite (coefficient de corrélation r supérieur à 0,95-fig4)

La formule, telle qu'elle est exposée ci-dessus, laisserait supposer une croissance de l'ETR infinie en fonction des précipitations. Cependant, celle-ci n'ayant en pratique jamais dépassé 150 mm, la formule reste valable dans les limites supposées par la réalité (ETR = 13,9 mm pour P = 650 mm maximum admissible)

L'équation de cette droite est la suivante :

$$ETR = 10,3 \log_{10} P - 15,1$$

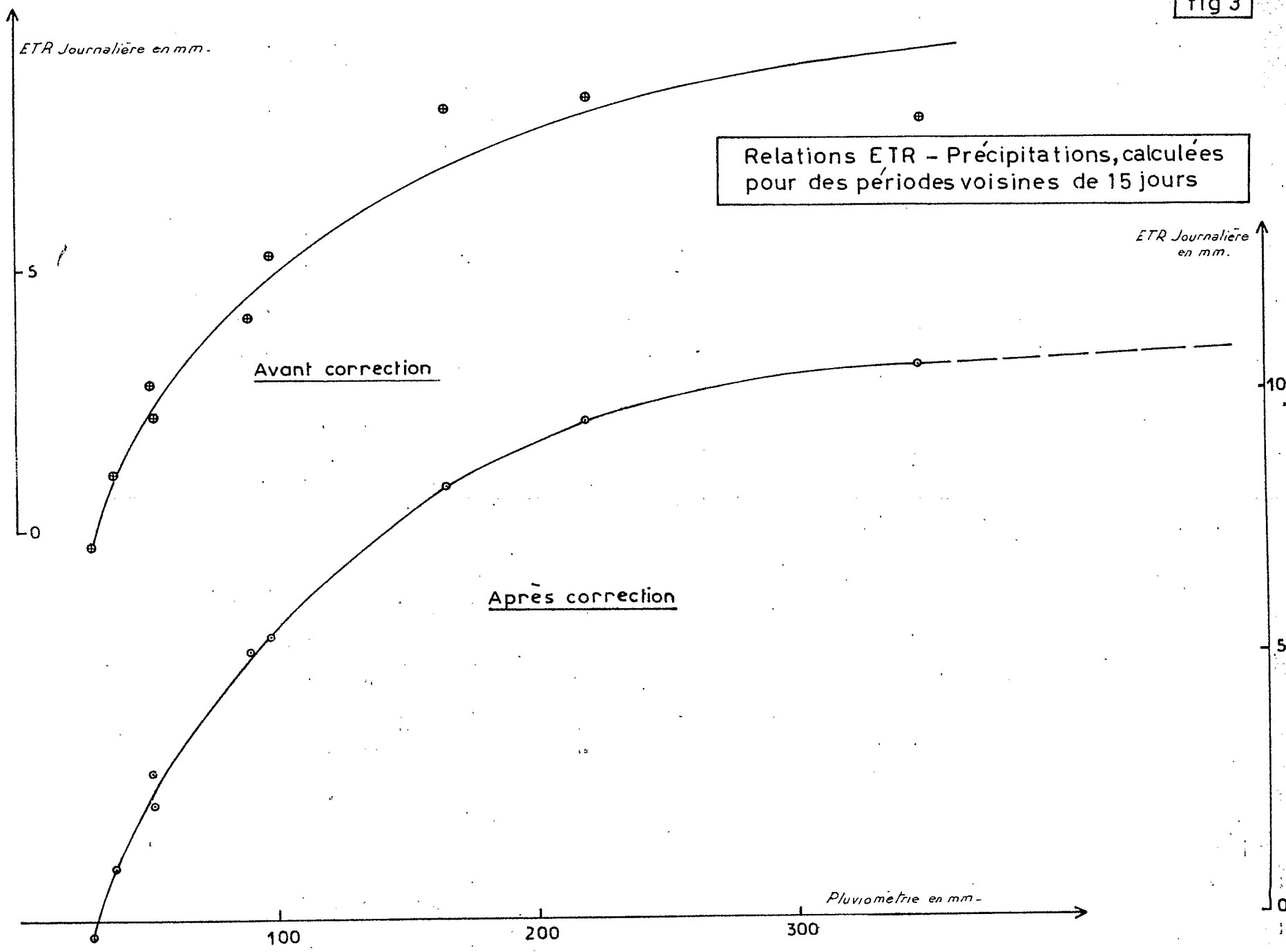
→ Elle nous permet de tracer l'abaque fig 5 qui donne directement l'évapotranspiration journalière en fonction du total des précipitations tombées pendant 15 jours. Il faut remarquer que cette équation n'est valable en saison des pluies lorsque la hauteur pluviométrique par quinzaine est supérieure à 30 mm. En deçà de cette valeur et pour la saison sèche la régression du profil apporte des renseignements suffisants (a).

Le bilan pour ^{de} courtes périodes est représenté à la fig 6.

Le bilan pour toute la période du 28 Octobre au 25 Février, calculé de la même façon que pour les courtes périodes, est le suivant :

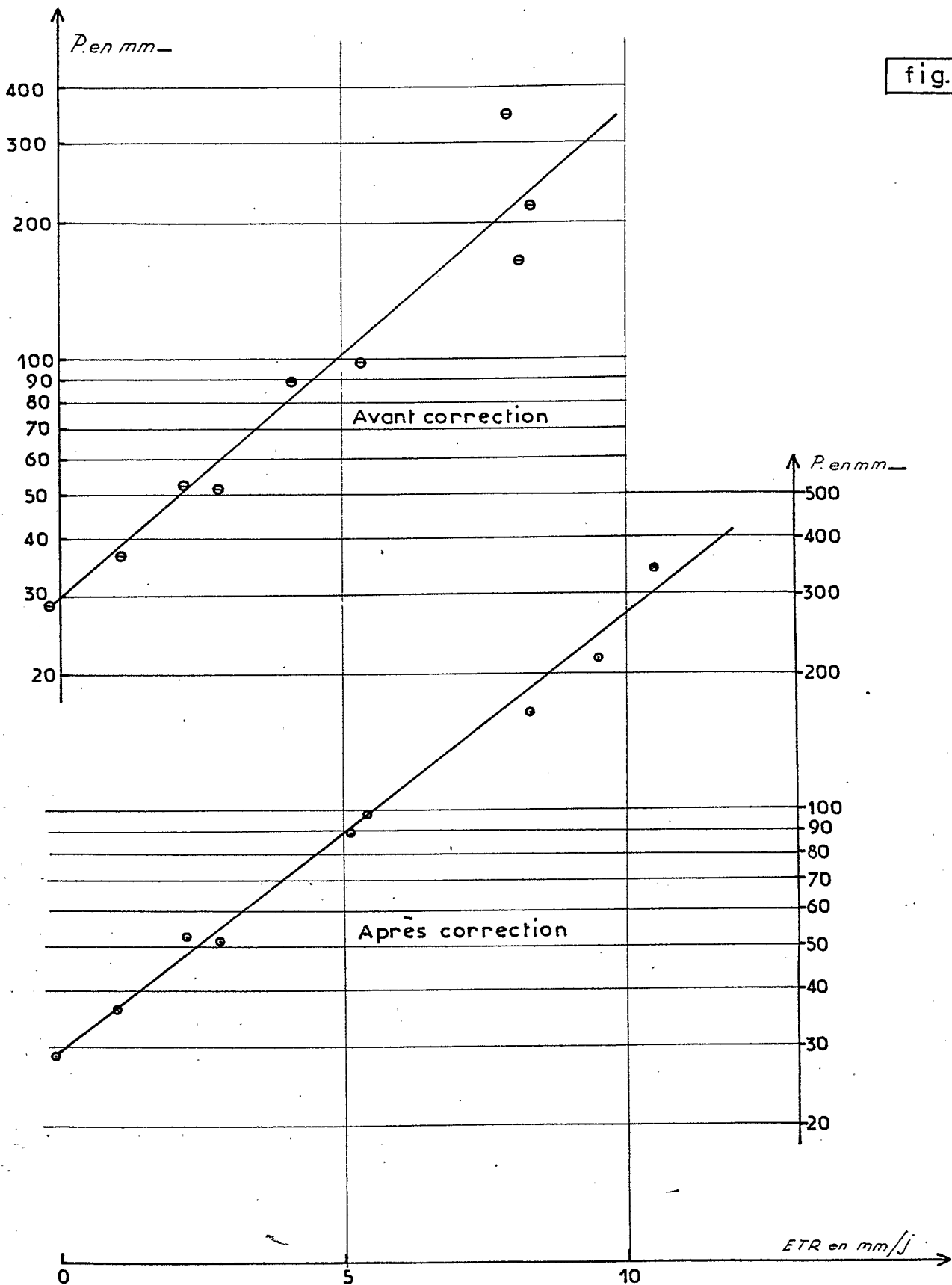
.../...

fig 3



Croissance de l'ETR en fonction des précipitations
recueillies en 15 jours

fig.4



Abaque pour la détermination de l'ETR journalière en fonction des précipitations (période 15 jours)

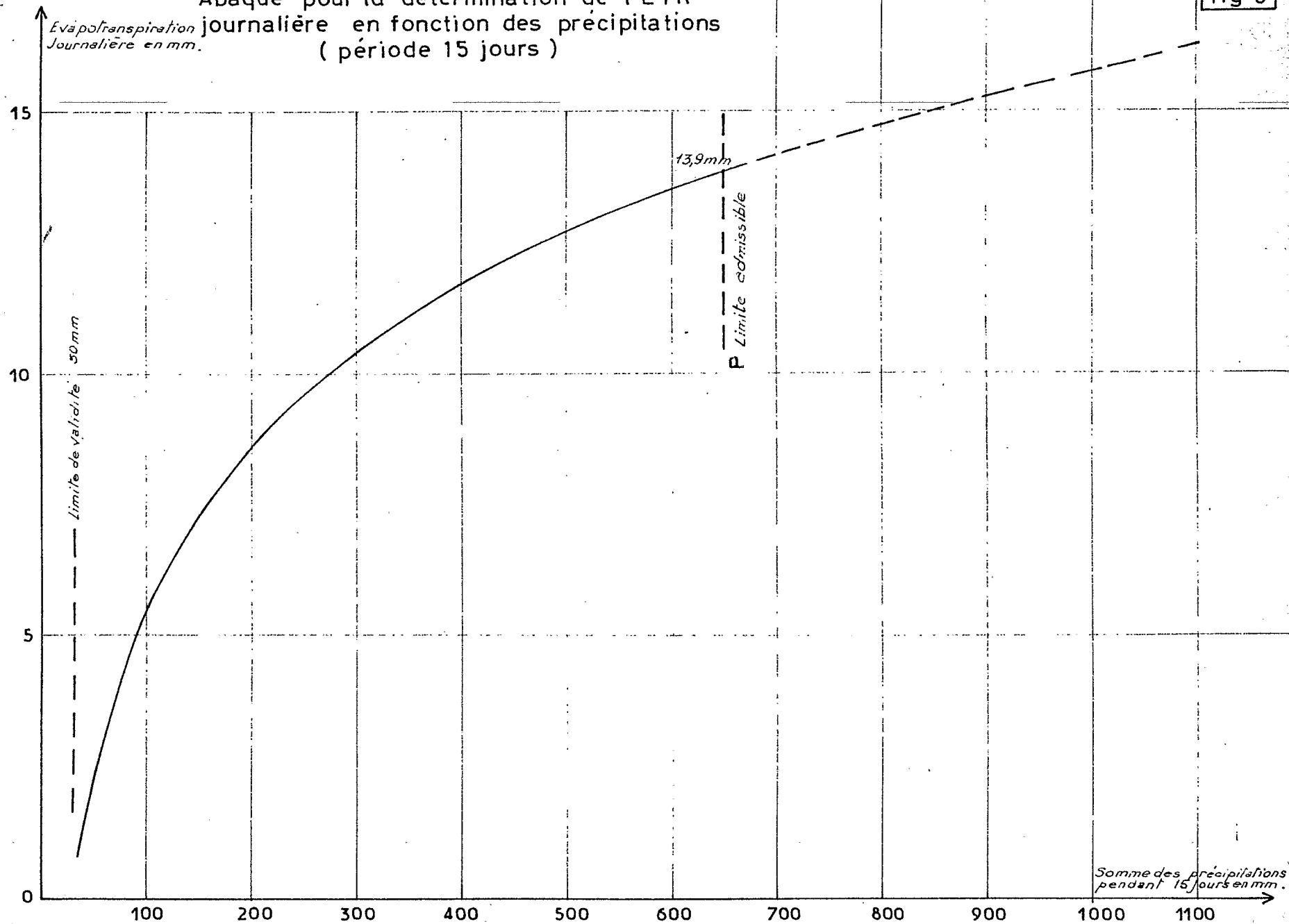
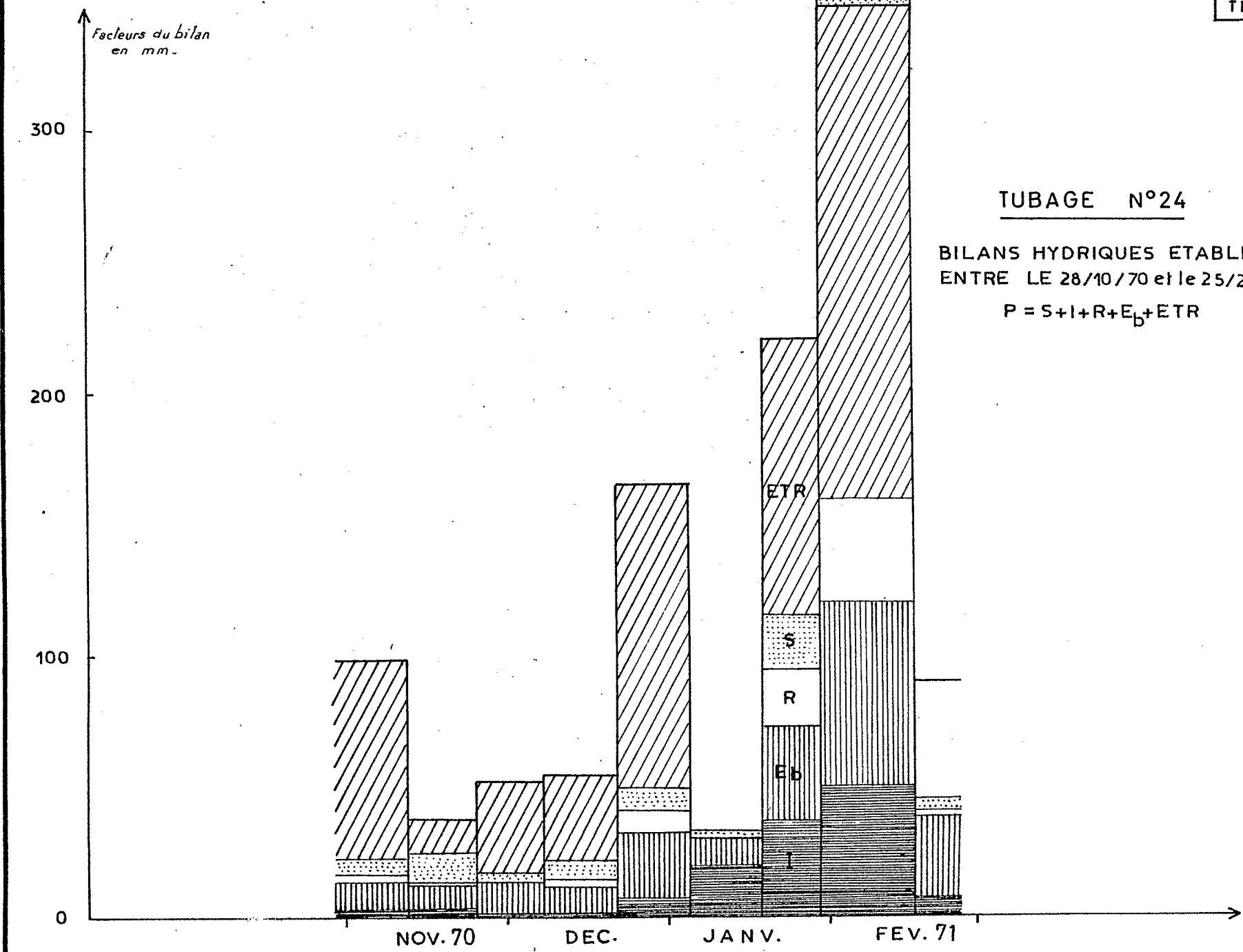


fig 6



P = 1087,0 mm
 S = 54,4 mm
 I = 124,5 mm
 R = 76,1 mm
 E_p = 215,3 mm
 ETR = 616,7 mm soit 5,1 mm/j. pendant 120 jours

*surpondérer
valable.*

On pourra reprocher à la méthode développée ci-dessus, le fait que l'évapotranspiration calculée est celle d'un point particulier, valable aux alentours immédiats du point n° 24. Qu'en est-il pour l'ensemble du bassin versant au cours de cette période ?

Nous pensons qu'un facteur correctif peut être calculé et nous permettre une évaluation très proche de la réalité. En effet, ^{malgré les} ~~si on considère~~ ^{différences notables observées pour des épisodes plus courts} ~~la totalité de la période, soit 120 jours,~~ le total des précipitations recueillies en moyenne sur le bassin ^{pendant la totalité de la période,} ~~(soit que différent pour de~~ ^{soit 120 jours,} ~~courtes périodes)~~ est égal à 1088,1 mm soit une valeur très proche de celle observée au n° 24 (1087,0 mm) et qui peut être considérée comme équivalente. En faisant intervenir :

- l'écoulement global à l'exutoire E_g = 368,2 mm

- la variation du niveau de la nappe sur l'ensemble du bassin basée sur les cartes isopiéziques établies le 29 Octobre 1970 et le 26 Février 1971, variation qui est de 70 centimètres soit 105 mm,

on arrive à une évapotranspiration réelle totale, pour toute la période, de 560,5 mm soit 4,7 mm/J. Le facteur correctif à apporter pour que les valeurs observées sur le n° 24 soient applicables au bassin tout entier est alors :

$$K = \frac{560,5}{616,7} = 0,91$$

~~et les valeurs consignées dans la deuxième partie du tableau n° 3 doivent donc être modifiées par l'application de ce coefficient.~~
 Ce coefficient, très proche de 1, semble prouver que le tubage n° 24 est assez représentatif du bassin pour l'ensemble de la période. On peut donc espérer qu'il en est de même pour des périodes plus courtes et ~~ne pas~~ ^{modifier} en conséquence les valeurs consignées dans la deuxième partie du tableau n° 3.

La formule générale donnant, à partir des observations sur le n° 24, l'évapotranspiration réelle sur l'ensemble du bassin devient :

$$ETR = 9,36 \log_{10} P - 13,7$$

IV/ - CONCLUSIONS.-

Ainsi grâce à l'humidimètre à neutrons, une série de mesures rapprochées faites sur un tubage atteignant la nappe a permis de connaître l'évolution complète d'un profil et la mise en réserve dans la zone non saturée au cours d'un épisode pluvieux. Cette connaissance d'un paramètre jusqu'à présent mal connu, jointe aux mesures maintenant classiques en hydrologie, nous a donné la possibilité d'approcher la valeur du dernier facteur : l'évapotranspiration réelle. Bien sûr de nombreuses mesures restent à faire, de nombreux problèmes demandent à être résolus mais nous pensons qu'un pas si modeste soit-il a été fait vers ce qui est un rêve cher à l'hydrologue : la détermination de tous les termes du bilan hydrique à partir des seules données des précipitations.

B I B L I O G R A P H I E

(a) POURRUT (P) - Utilisation pratique de l'humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques. Premiers résultats obtenus sur le bassin versant de la TAFAINA (République malgache). Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, Vol V; n° 2, 1968.

(b) POURRUT (P) - ZEBROWSKI (C) - Détermination de certaines caractéristiques intrinsèques et hydrodynamiques des sols par utilisation de méthodes neutroniques en République malgache. Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, Vol VII, n° 1, 1970.

(c) MARCESSE (J) - Exploitation de mesures neutroniques pour calculer les bilans hydriques et les doses d'arrogage. Note technique multigraphiée - Mai 1970.