

essai de détermination neutronique de l'évapotranspiration réelle d'un terrain gazonné des hauts plateaux malgaches

H. RAKOTOFIRINGA - P. MOUTONNET

Les auteurs se proposent de déterminer, à partir de l'humidimètre à neutrons, le bilan hydrique mensuel d'un terrain gazonné, comparativement à deux méthodes classiques : cuve lysimétrique et formule climatique.

Deux cuves lysimétriques sont conduites, l'une en Evapotranspiration Réelle (ETR), et l'autre en régime d'Evapotranspiration Potentielle (ETP). La formule de Prescott a été retenue car, selon J. Riquier, elle présente de nombreux avantages par rapport aux autres formules et semble la mieux adaptée au climat de Madagascar.

L'humidimètre à neutrons permet de déterminer la variation des réserves hydriques du sol et compte tenu de la pluviométrie et de la percolation, de connaître l'ETR. Il permet aussi de définir la capacité de rétention du sol et d'estimer ainsi les Réserves Facilement Utilisables.

Les résultats obtenus ont conduit aux principales observations suivantes :

- l'ETP calculée à partir de la formule Prescott est nettement inférieure à celle obtenue sur cuve lysimétrique notamment en saison des pluies,
- l'ETR au champ et sur cuve lysimétrique est supérieure à l'ETP Prescott en saison des pluies et inférieure en saison sèche tout en restant toujours inférieure à ETP cuve,
- l'ETR au champ suit de près l'ETR cuve.

Pour confirmer ces observations, il paraît nécessaire de poursuivre l'essai pendant une année au moins et en prenant certaines précautions déduites des expériences antérieures. Néanmoins, si le drainage et le ruissellement sont connus, on peut penser dès maintenant, que la sonde à neutrons permet d'appréhender l'ETR avec suffisamment de précision et qu'elle est d'une grande utilité dans la détermination du bilan hydrique mensuel sur sols ferrallitiques de Madagascar.

La sonde à neutrons a déjà trouvé de nombreuses applications à Madagascar dans des domaines variés tels que : le contrôle de l'irrigation des cotonniers (1), la détermination de certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols (2, 3, 4)... Dans le but d'approfondir les possibilités de cet

appareil en pays tropical humide, nous avons voulu l'utiliser pour la détermination du bilan hydrique mensuel sur terrain gazonné, comparativement à deux méthodes classiques : cuve lysimétrique et formule climatique (*) de Prescott (5).

Le bilan hydrique mensuel d'un terrain de culture s'établit selon l'équation :

$$\Delta R = P + I + B - (ETR + A + C)$$

- ΔR = variation mensuelle des réserves hydriques du sol
- P = pluviométrie mensuelle
- I = apports d'eau par irrigation
- B = remontée capillaire à partir de la nappe phréatique
- ETR = évapotranspiration réelle de la parcelle
- A = pertes d'eau par percolation
- C = pertes par ruissellement.

Dans le cas qui nous occupe, trois termes de l'équation peuvent être écartés :

- I : puisqu'on ne pratique pas d'irrigation.
- B : du fait de l'absence de nappe superficielle.
- C : à cause de la grande perméabilité du sol et l'horizontalité de la surface.

Il en résulte :

$$ETR = P - \Delta R - A$$

L'humidimètre à neutrons nous permet de mesurer ΔR avec précision; on en déduit alors une estimation de ETR qui est d'autant plus exacte que A - non mesurable directement - est faible.

Le dispositif expérimental mis en place nous a permis d'appréhender A et de juger ainsi de la validité des mesures ETR effectuées au champ.

(*) : Selon Prescott, la formule générale donnant l'ETP est :

$$ETP = K \cdot E_w^{0,75}$$

K = coefficient variable avec le type de végétation; dans notre cas on a adopté $K = 1,5$.

E_w = évaporation (mm) d'une surface d'eau libre estimée d'après le déficit absolu de saturation S_d (mm Hg)

$E_w = 7,07 S_d$ pour une période de 10 jours

S_d = tension de vapeur saturante à la température moyenne décadaire x déficit relatif

Déficit relatif = $1 -$ humidité moyenne décadaire.

1 - EMLACEMENT ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les essais ont été réalisés sur un terrain du Laboratoire de Radio-Isotopes situé aux environs immédiats de Tananarive. Le sol, du type ferrallitique profond, caractéristique des Hautes Terres, est soumis à un climat tropical contrasté avec plus de 1 200 mm de pluies annuelles réparties pendant la saison chaude, et une saison sèche marquée.

En Octobre 1967, deux tubes d'accès de sonde à neutrons ont été implantés sur une parcelle du terrain couverte de Kikouyou (*Pennisetum clandestinum*). Ces tubes d'une longueur de 230 cm sont distants de 5 mètres. D'autre part, en Octobre 1969, deux cuves lysimétriques et un ensemble d'appareils de mesures météorologiques ont été installés sur une parcelle 2, proche de l'emplacement précédent (Figure 1). Les cuves, enterrées, ont 80 cm de diamètre et 90 cm de hauteur. Une des cuves est conduite en mesures ETR, l'autre en régime ETP (Evapotranspiration potentielle) avec un plan d'eau de 10 cm assurant une alimentation hydrique optimum continue. Chaque cuve est équipée en son centre d'un tube d'accès de sonde à neutrons (Figure 2).

L'ensemble d'appareils de mesures météorologiques comporte :

- 1 thermomètre maximum - minimum
- 2 thermomètres, (sec et humide)
- 1 évaporomètre Piche.

2 - RESULTATS OBTENUS

Nous examinerons successivement les résultats obtenus au champ par la méthode neutronique puis les valeurs correspondantes sur cuves lysimétriques.

2.1 - Détermination neutronique de l'Evapotranspiration réelle d'une parcelle de Kikouyou

Les mesures se sont poursuivies du 20-10-67 au 15-9-70. Le dispositif mis en place permet le contrôle périodique de l'état des réserves hydriques d'une tranche de sol de 2 mètres d'épaisseur.

La droite d'étalonnage de l'appareil a été déterminée au champ :

$$\begin{aligned} H_v \% &= 0,138 N - 4,9 \\ \text{avec } r &= 0,970 \\ S &= 1,33 \end{aligned}$$

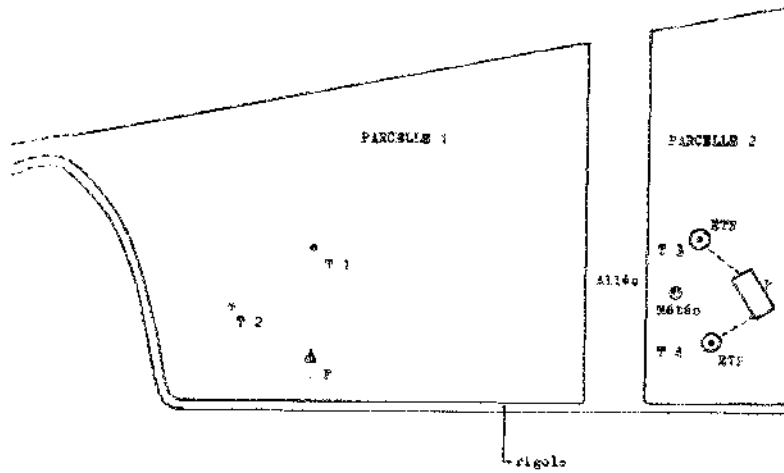
H_v = humidité volumique

N = nombre d'impulsions par seconde

r = coefficient de corrélation

S = erreur-type d'estimation sur la détermination de l'humidité du sol à partir des mesures neutroniques.

PLAN DES INSTALLATIONS



P : Fluviomètre
 P : "Pointe de réception"
 Echelle : 1/200

Département Laboratoire

Figure n°1 : Plan des installations

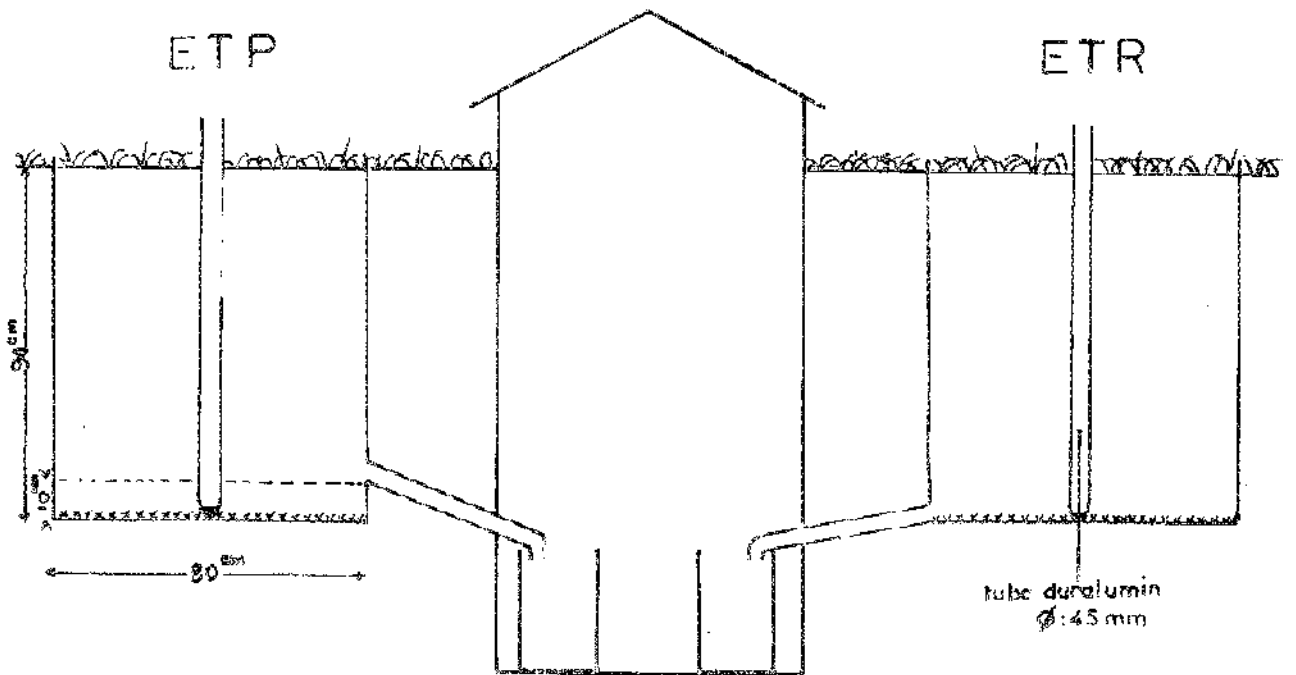


Figure n°2 : Les cuves lysimétriques avec les tubes d'accès

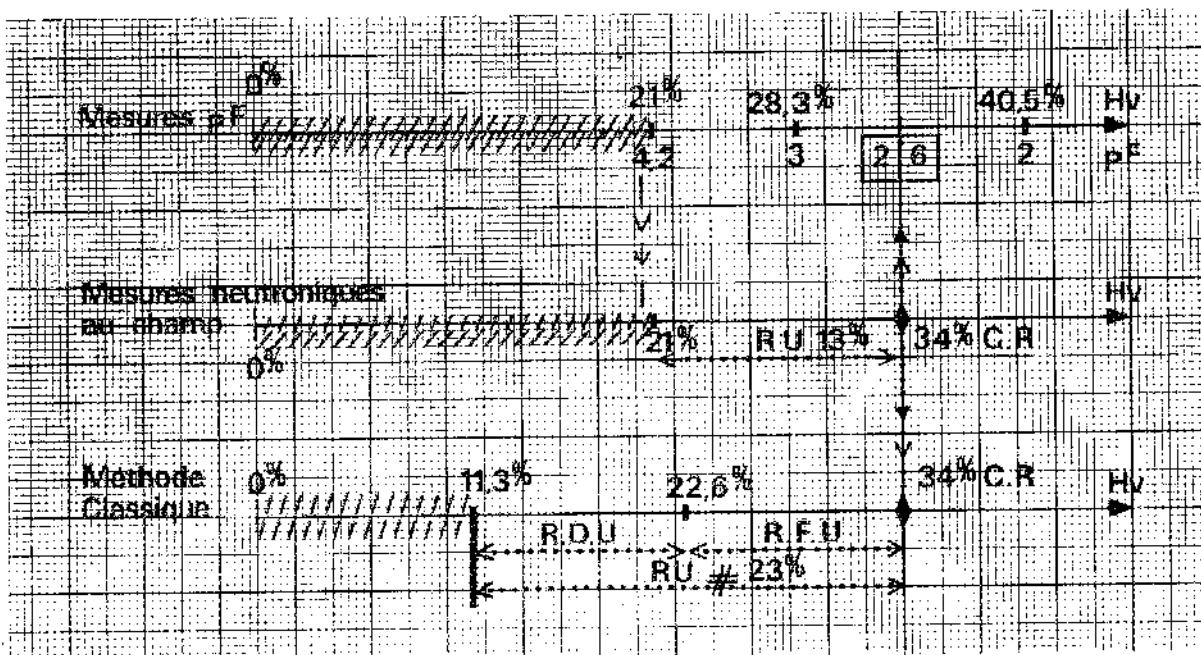
Les mesures de Laboratoire effectuées sur ce type de sol sont regroupées dans le Tableau 1

pF	2	3	4,2			
Humidité % Hts	28,9	20,2	15,0			
Humidité % volumique	40,5	28,3	21,0			
Granulométrie : 44,4 % sable; 39,0 % argile, 13,5 % limon						
Composition chimique :						
H ₂ O ⁺ %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	K ₂ O %	Na ₂ O %
12,9	45,6	28,6	0,9	11,25	0,08	0,15

TABLEAU 1 : Différentes caractéristiques du sol du point d'essais

La figure 3 donne les profils correspondant aux variations extrêmes d'humidité. L'assèchement du sol, sur 2 m de profondeur est, en saison sèche, de 257 mm pour T1 et 263 mm pour T2, soit 260 mm en moyenne. Ces profils hydriques donnent une capacité de rétention du sol voisine de 34 % Hv, valeur qui s'apparente aux mesures de laboratoire faites vers pF 2, 6. En saison sèche, le dessèchement du sol est très marqué puisqu'on approche du point de flétrissement permanent mesuré à pF 4, 2. Il semble donc que les Réserves Utilisables (R.U.) soient plus faibles que celles prévues par la méthode classique du tiers supérieur de la capacité de rétention : 260 mm sur 2 m de sol contre 450 mm.

Pour nous résumer :



Le problème de la détermination en laboratoire de la Capacité de Rétention du sol reste posé (6), en particulier sur sols ferrallitiques tropicaux.

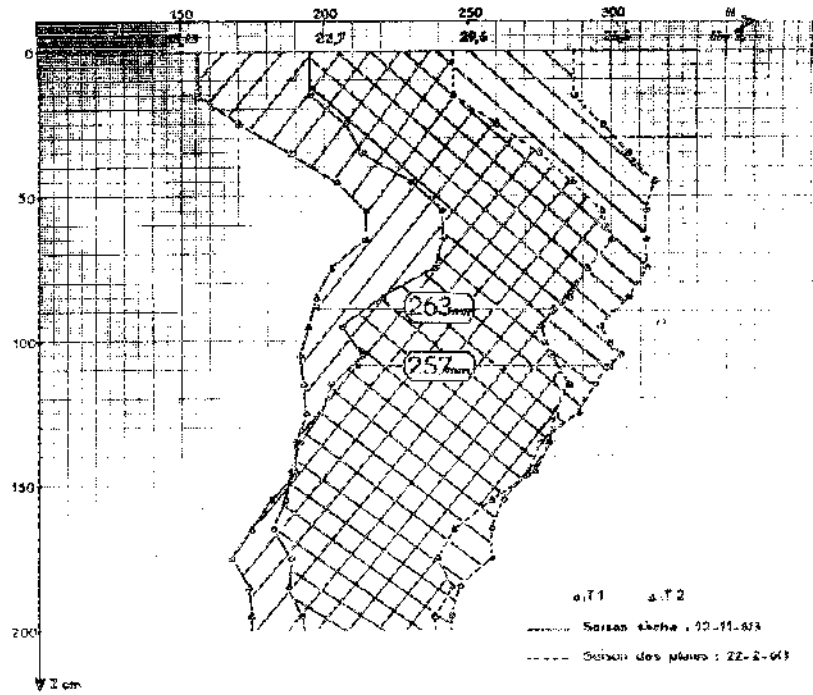


Figure n°3 : Variations extrêmes de l'humidité du sol au champ (Tubes T1 et T2)

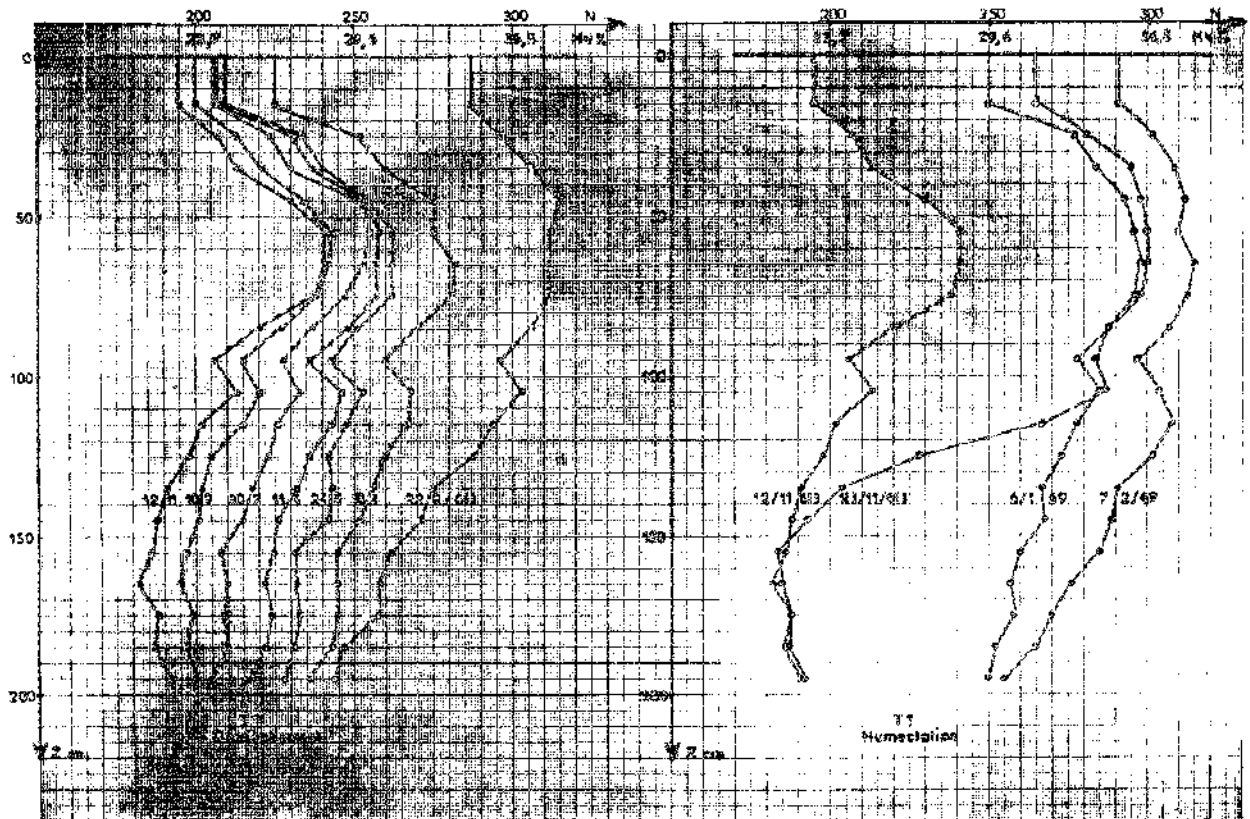


Figure n°4 : Profils en humidification et en dessèchement au champ (Tube T1)

La Figure n° 4 donne pour T1 une série de profils consécutifs au cours du dessèchement du sol puis en voie d'humectation. On remarque, en particulier, la puissance du système racinaire du Kikouyou qui s'alimente en saison sèche sur une profondeur de sol supérieure à 2 m. On en déduit que les déterminations neutroniques faites pendant cette période conduisent à une sous-estimation de l'ETR laquelle sera limitée ultérieurement par la mise en place de tubages plus profonds.

Le Tableau n° 2 donne l'évolution globale du stock d'eau du sol pour un horizon de 2 m d'épaisseur. Compte tenu de l'état des réserves et de la pluviométrie, en négligeant le ruissellement, on détermine les besoins hydriques apparents du couvert végétal. En saison des pluies, certaines valeurs ont été déterminées par excès du fait de percolations profondes. La mise en place de cuves lysimétriques a permis d'appréhender, pendant la saison des pluies 1969/1970, le paramètre percolation. La méthode, sur sol remanié et cuve peu profonde, est sujette à caution (7). On l'améliore en tenant compte, grâce aux profils neutroniques obtenus au champ, de la recharge des réserves hydriques des horizons profonds. Par exemple, du 16 Décembre au 31 Décembre 1969, avec une pluviométrie de 312 mm, on enregistre sur cuve ETR une perte par percolation de 147 mm. Par contre, sur les Tubes 1 et 2, la mise en réserve au niveau des horizons profonds est de 139 mm (respectivement 122 et 155 mm). La quantité d'eau percolée à travers 1 m de sol est récupérée, au champ, par l'horizon sous-jacent. Dans ce cas particulier - fréquent en début de saison des pluies - la correction relative aux pertes par percolation n'est pas à faire puisqu'on considère que l'eau mise en réserve entre la surface du sol et 2 m de profondeur reste à la disposition des racines. Passé ce premier stade, les pluies sont pratiquement quotidiennes; faute de disposer de tubes profonds, on considère - l'humidité du sol ne descendant pas au-dessous de sa capacité de rétention - que la quantité d'eau percolée en cuve l'est également au champ.

On a voulu aussi effectuer ce type de correction sur les valeurs obtenues au champ pendant les saisons des pluies 1967/1968 et 1968/1969 alors que les cuves lysimétriques n'étaient pas encore installées. L'étude comparée sur les trois saisons des pluies consécutives, des profils hydriques relevés au champ, de la pluviométrie et de sa répartition, et de la percolation en cuve ETR au cours de la dernière saison des pluies, permet une estimation approchée des pertes par percolation, compte tenu des besoins hydriques moyens des végétaux.

Dans ce Tableau n° 2, la détermination mensuelle de l'CTR prend pour base la moyenne des valeurs obtenues respectivement sur T1 et T2; il existe une corrélation très étroite entre les valeurs ETR obtenues, d'une part sur T1, d'autre part sur T2; pour les besoins hydriques (mm/j), la formule de BRAVAIS - PEARSON donne un coefficient de corrélation égal à 0,979.

2.2 - Renseignements obtenus sur cuves lysimétriques

Chaque cuve étant pourvue d'un tube d'accès de sonde à neutrons, on a pu contrôler périodiquement l'état des réserves des bacs et les faire intervenir dans le calcul des ETR et ETP. La Figure n° 5 donne une série de profils enregistrés sur la cuve ETR. On note, du fait du remaniement du sol à la mise en place des cuves, une diminution sensible de la capacité de rétention. Le bilan global est modifié sur cuve ETR, dans le sens d'un déficit hydrique accru : la diminution des réserves en saison sèche est de 127 mm (pour 76 cm d'épaisseur du sol) contre 260 mm (pour 2,00 m) en plein champ. Le Tableau n° 3 regroupe les résultats obtenus sur chacune des cuves lysimétriques. On remarquera sur traitement CTR, des pertes par percolation,

Dates	Saison des pluies 1967/1968										Saison des pluies 1968/1969										Saison des pluies 1969/1970																
	20-10-67	24-11	4-12	18-1-68	22-2	18-3	30-4	24-5	11-6	12-7	30-7	18-8	12-11	18-4	29-11	12-12	6-1-69	7-2	17-3	18-4	19-5	20-6	21-7	26-8	18-9	29-10	18-12	31-12	14-1-70	12-2	15-3	12-3	14-7	12-8	18-8		
Pluies (mm)	257	58	317	243	166	38	0	7	14	0	1	6	138	97	46	184	292	131	41	35	4	5	0	0	0	78	224	312	261	255	144	137	19	0	6		
Tubes n°1 Δ Stock (mm) Profondeur: 0-20cm	+192	+51	+9	+37	-36	-28	-21	-20	-21	-9	-21	-39	+23	+48	-7	+34	+63	-141	-52	-29	-17	-19	-2	-12	+35	+98	+127	-17	+3	-65	-11	-70	-7	21			
	Consommation appareils (mm/jour)																																				
Tubes n°2 Δ Stock (mm) Profondeur: 0-20cm	+166	+74	+11	+15	-65	-36	-19	-12	-12	+3	-28	-77	+122	+61	-4	+71	+43	-97	-70	-26	-15	-15	+8	-27	+19	+77	+155	-5	-12	-67	-33	-88	-45	-22			
	Consommation appareils (mm/jour)																																				
Tubes n°1 et n°2 Consommation moyenne T ₁ -T ₂ (mm/jour)	2,4	2,9	6,3	5,1	5,1	3,3	1,4	1,2	1,0	0,6	1,3	1,1	2,7	4,3	3,7	5,2	7,4	6,5	3,8	2,0	0,6	0,6	0,1	0,8	1,3	2,9	11,6	10,4	9,2	7,1	5,4	1,5	1,6	0,6			
	Consommation moyenne saison (mm)																																				
Tubes n°1 et n°2 ETR mensuels (mm)	74	75	158	174	168	117	42	32	22	38	33	79	144	159	151	135	78	45	18	14	7	29	41	27	224	227	112	183	99	55	35	25	24				
	Mois																																				

a = Valeurs corrigées des pertes par évaporation

Tableau n°2 : Evolution globale du stock d'eau du sol

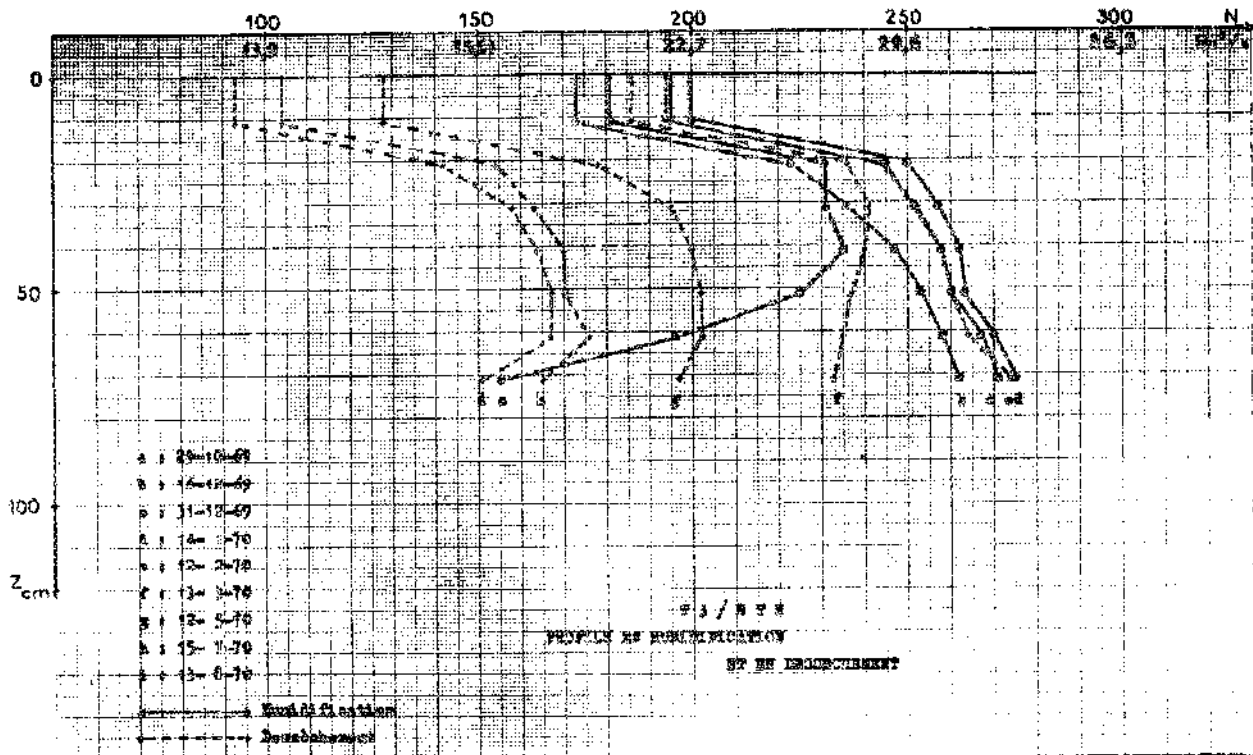


Figure n°5 : Profils en humidification et en dessèchement sur cuve ETR (Tube T3)

Saison des Pluies 1969/1970

Dates	29-10-69	16-12	31-12	14-1-70	12-2	13-3	12-5	15-7	13-8	15-9	30-9
Pluies (mm)	224	312	264	265	144	137	10	0	6	0	
Percolation (mm)	7	147	123	121	49	22	0	0	0		
Δ Stock (mm)	+32	+18	+5	-6	-24	-36	-36	-11	-20		
Nombre de jours entre deux mesures	46	15	14	29	29	60	64	29	33	15	
Consommation (mm/jour)	3,8	9,8	9,5	3,2	4,1	2,8	0,7	0,4	0,8		
Consommation moyenne/saison (mm)	5,9						6,6				
E T R mensuelle (mm)	114	208	221	128	104	84	47	21	17	20	24
Mois	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aou.	Sep.
Apport d'eau (mm)	194	65	60	298	438	865	883	251	287	173	
Percolation (mm)	9	203	173	231	243	645	625	179	193	107	
Δ Stock (mm)	+20	+8	-13	+24	-3	+5	-6	-3	-7		
Consommation (mm/jour)	8,1	11,1	11,5	10,6	11,8	5,9	4,4	2,6	3,3	3,9	
Consommation moyenne/saison (mm)	9,8						3,5				
E T P mensuelle (mm)	243	296	341	316	260	177	154	132	108	91	106
Mois	NOV.	Déc.	Jan.	Fév.	MAR.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aou.	Sep.

Tableau n°3 : Résultats obtenus sur cuves lysimétriques

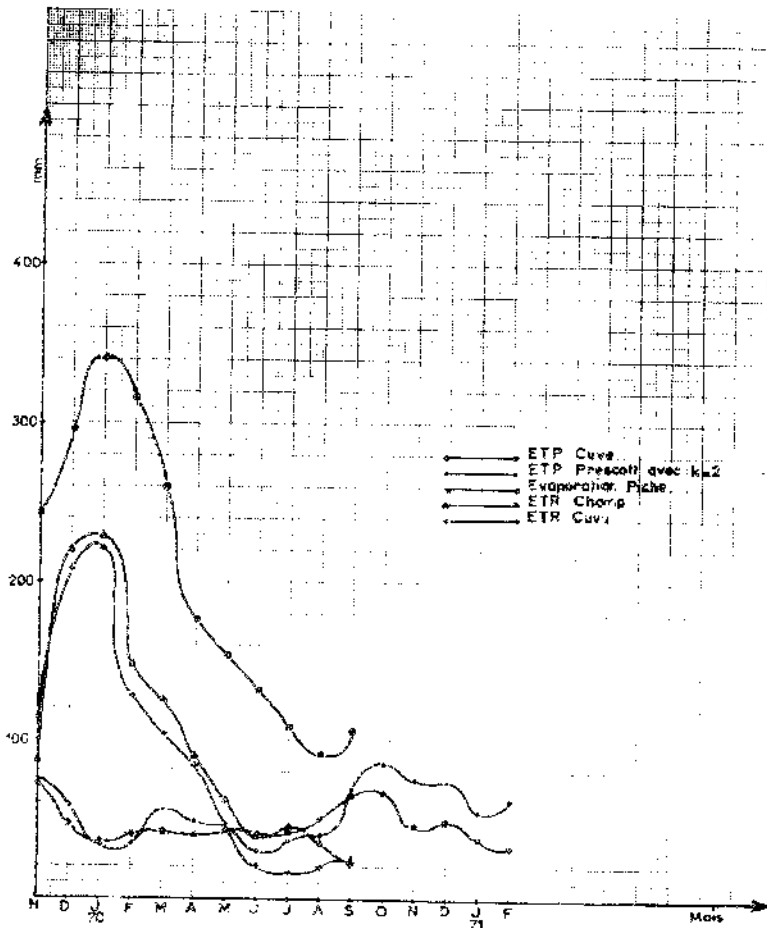


Figure n°6 : Courbes des Evapotranspirations comparées

relativement importantes; pendant la saison des pluies 69/70, les pertes de ce type sont de 469 mm sur une pluviométrie totale de 1 343 mm (soit 35 % en cuve). La prise en compte du facteur percolation dans le bilan établi au champ permet une correction importante des valeurs ETR :

On obtient ainsi :

Dates	ETR champ (mm/j)	ETR cuve (mm/j)
20 - 10 - 69 au 16 - 12 - 69	2,9	3,8
16 - 12 au 31 - 12	11,6	6,6
31 - 12 au 14 - 1 - 70	10,3	9,5
14 - 1 au 12 - 2	5,0	5,2
12 - 2 au 13 - 3	5,5	4,1
13 - 3 au 12 - 5	3,0	2,8
12 - 5 au 15 - 7	1,3	0,7
15 - 7 au 13 - 8	0,5	0,4
13 - 8 au 15 - 9	0,8	0,8

Il existe encore une corrélation très étroite entre les valeurs journalières ETR champ et ETR cuve : ces valeurs comparées donnant un coefficient de corrélation de 0,983. Cela permet de confirmer les possibilités et la représentativité globale des mesures neutroniques.

2.3 - Comparaison des résultats

2.3.1 - Etude comparative des Evapotranspirations

Sur un même graphique sont représentées (Figure n° 6) les courbes ETP cuve, ETP Prescott, ETR cuve, ETR champ et Evaporation Piche.

On constate que :

- la courbe ETP Prescott suit de près celle représentant l'évaporation Piche, comme l'a signalé J. Riquier (5).
- il y a un certain parallélisme entre la courbe ETP cuve et les courbes ETR. En saison des pluies, ces courbes devraient en principe se rapprocher et la différence relativement importante que l'on observe ici peut être due à l'état de la végétation.
- d'une part les valeurs ETR Prescott sont très inférieures aux valeurs ETR cuve, notamment en saison des pluies; d'autre part, il ne semble pas qu'il y ait une correspondance entre le sens des variations de ces deux courbes; en particulier les valeurs ETP cuve fluctuent avec une amplitude bien plus grande. On note également la supériorité anormale des valeurs ETR aux valeurs ETP Prescott en saison des pluies. Ces observations nous amènent à penser que la détermination de l'ETP par la formule Prescott n'est pas très adaptée, au climat des Hautes Plateaux Malgaches. Une étude plus approfondie de la question s'avère nécessaire.

2.3.2 - Courbes Pluie - Evapotranspirations

Les Figures 7 et 8 donnent respectivement les courbes Evapotranspiration Potentielle Prescott et Evapotranspiration Réelle au champ suivant le système de représentation de Thornthwaite.

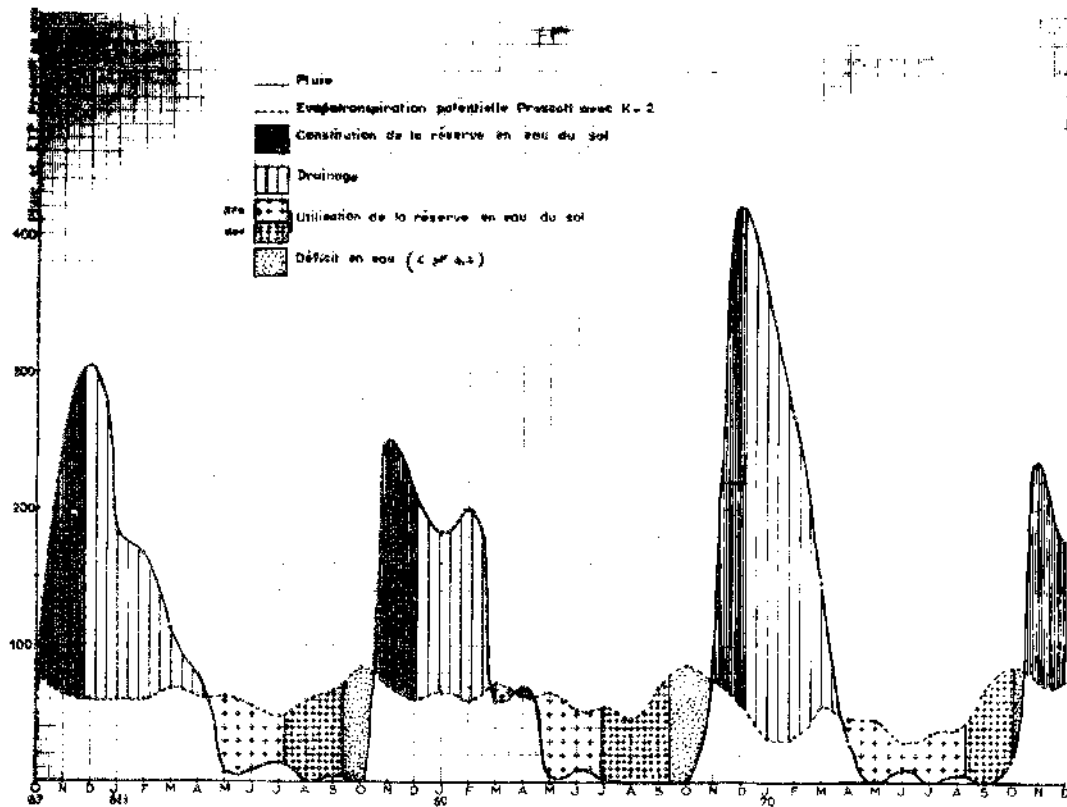


Figure n°7 : Courbes Pluies
Evapotranspiration Potentielle Prescott

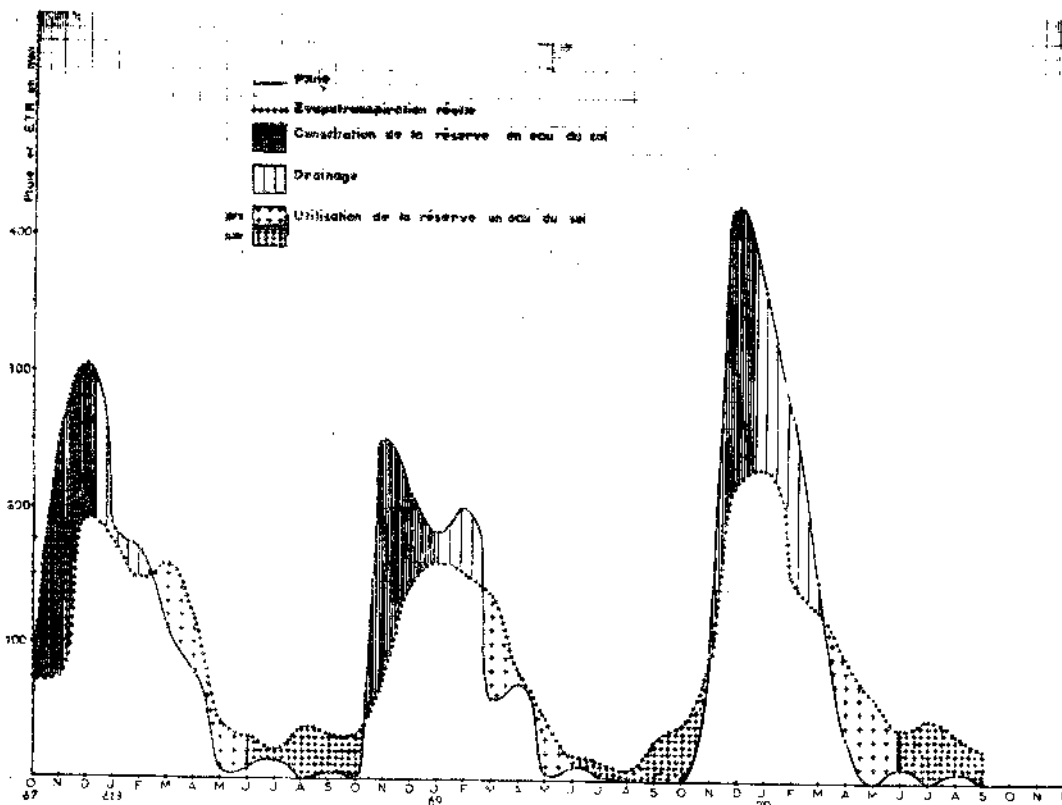


Figure n°8 : Courbes Pluies
Evapotranspiration réelle champ

- la reconstitution des réserves hydriques du sol nécessite en moyenne 260 mm;
- on estime ensuite la quantité d'eau percolée par différence entre la pluviométrie et l'évapotranspiration;
- en saison sèche, il y a utilisation des réserves :
 - . 130 mm de réserves Facilement Utilisables,
 - . 130 mm de Réserves Difficilement Utilisables, on est en période de déficits hydriques,
 - . en deçà, on atteint et dépasse le point de flétrissement permanent.

Les différentes valeurs de ces paramètres, mesurées d'Octobre 1967 à Décembre 1970 sont regroupées dans le Tableau qui suit :

		Saison des pluies 1967/1968	Saison sèche 1968	Saison des pluies 1968/1969	Saison sèche 1969	Saison des pluies 1969/1970	Saison sèche 1970
Selon Prescott	Percolation mm	438	-	320	-	163	-
	Déficit hydrique mm	-	a/c 21-7 210	-	a/c 12-7 229	-	a/c 24-8 154
Selon mesure ETR au champ	Percolation mm	54	-	62	-	256	-
	Déficit hydrique mm		a/c 15-6 114		a/c 24-6 84		a/c 12-6 -

On remarque que les conditions d'humectation du sol sont propices aux cultures, en moyenne, du :

- 1 Novembre au 1 Août selon Prescott;
- et du 1 Novembre au 15 Juin selon les mesures neutroniques d'ETR au champ.

Précisons qu'il s'agit là d'une valeur moyenne d'humidité sur une tranche de 2 m d'épaisseur de sol; l'assèchement préférentiel des horizons de surface, en début de saison fraîche (saison sèche), conduit à une réduction dans le temps de la période propice au développement des plantes, phénomène d'autant plus marqué que celles-ci sont à enracinement superficiel. En ce qui concerne le Kikouyou, on observe chaque année - au champ - un jaunissement temporaire des feuilles alors que ce n'est pas le cas en cuve lysimétrique ETP. Il semble donc que cette graminée souffre d'un déficit hydrique relativement précoce allant de pair avec un abaissement sensible de la température; ceci confirme nos observations relatives à la détermination des réserves hydriques utilisables.

3 - CONCLUSION

La méthode neutronique de mesure de l'humidité du sol a été utilisée avec profit pour la détermination de l'Evapotranspiration Réelle d'un terrain gazonné des Hauts Plateaux Malgaches, concurremment à deux méthodes classiques : cuves lysimétriques et formule climatique de PRESCOTT.

On a pu mettre en évidence une discordance notable entre les valeurs ETR/ETP mesurées au champ ou en cuves lysimétriques et celles déterminées à partir de la formule climatique. Sur ces bases, on a étudié selon la représentation graphique de THORNTHWAITE, la reconstitution des réserves hydriques du sol, la percolation profonde, puis l'utilisation des réserves entre la Capacité de Rétention (34 % Hv mesurée au champ) et le point de flétrissement permanent (21 % Hv mesurée à pF 4,2 à la presse à membrane). On en déduit la durée de la période propice au développement des plantes à enracinement profond (1 Novembre au 15 Juin). Dans le cas de plantes à enracinement superficiel, la terme de la période favorable est lié, en saison fraîche, à la date d'assèchement de l'horizon prospecté.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. L.A. BUSCARLET et H. RAKOTEFIRINGA : *Un exemple d'utilisation de la sonde à neutrons au Mangoky. Terre Malgache* N° 6, 1969, pp. 121-137.

2. P. POURRUT - C. ZEBROWSKI : *Détermination de certaines caractéristiques intrinsèques et hydrodynamiques des sols par utilisation de méthodes neutroniques. Cahiers ORSTOM - TANANARIVE - Janvier 1970.*

3. P. POURRUT : *Utilisation pratique de l'humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques. Premiers résultats obtenus sur le bassin versant représentatif de la TAFAINA (Madagascar). Campagne 1966-1967. Cahiers ORSTOM hydrologie, vol. V n° 2, 1968, pp. 3-15.*

4. P. MOUTONNET : *Contrôle neutronique de l'humidité des sols sous culture cotonnière :*
a - point d'essais IRCT d'ANKILIVALO - Saison agricole 1970
b - point d'essais IRAM du PK 29, route MORONDAVA/MAHABO, saison agricole 1970.
Rapports internes LRI - Octobre 1970.

5. J. RIQUIER : *a - Note sur l'évapotranspiration de THORNTON et le bilan hydrique des sols*
b - Note complémentaire sur le bilan hydrique des sols.
Le Naturaliste Malgache 1958/1959.

6. A. COMBEAU - P. QUANTIN : *Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques - Rapprochement avec les courbes pF - Humidité.*
Science du sol, Mai 1969, n° 0, pp. 5-13.

7. E.J. ROOSE et P. HENRY des BUREAUX : *Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans un sol en place. Agronomie Tropicale, vol. XXV, 1970, n° 12, pp. 1079-1088.*