

*Peuplement de *Tapia* (*Uapaca bojeri*). Lac Itasy, Madagascar.*

# ÉTUDE COMPARATIVE DU BILAN HYDRIQUE D'UNE PARCELLE BOISEE ET D'UNE PARCELLE HERBEUSE A MADAGASCAR

par A. CORNET

*Laboratoire de botanique et d'Ecologie végétale  
de l'ORSTOM-Sénégal*

## SUMMARY

### **A COMPARATIVE STUDY OF THE WATER BALANCE IN A WOODED ECOSYSTEM AND A HERBACEOUS PLOT IN MADAGASCAR**

*The water balance was studied in a wooded ecosystem and in a herbaceous plot submitted to similar weather conditions in order to show the effect of the woody canopy on the water cycle. Throughfall, stemflow and soil moisture were measured from Novem-*

ber 1971 to December 1973. On empirical model of frequential analysis and simulation of the water balance was used. The results show that the woody canopy reduces runoff and drainage losses, and increases the part of the evapotranspiration.

## RESUMEN

### ESTUDIO COMPARATIVO DEL BALANCE HIDRICO DE UNA PARCELA ARBOLADA Y DE UNA PARCELA DE HIERBA, EN MADAGASCAR

La comparación del balance hídrico en un ecosistema formado por grupos de árboles diseminados y en una formación de hierba, ambos situados en las mismas condiciones climáticas, permite demostrar el papel diferencial del vuelo forestal en el ciclo del agua. La intercepción, el chorreo a lo largo de los troncos y la humedad del suelo, han sido seguidos con toda regularidad desde Noviembre de 1971 hasta Diciembre de 1973. El análisis del balance hídrico teórico ha sido realizado mediante la utilización de un modelo empírico de simulación y de análisis frecuencial. Se destaca de los resultados obtenidos que el vuelo forestal acarrea una disminución de un 50 % de las pérdidas de agua por chorreo y drenaje, que se compensa por un aumento del agua evaporada a nivel del vuelo vegetal. El arbolado modifica así el régimen hidrológico y climático de la parcela.

## INTRODUCTION

La connaissance de la répartition et du cycle de l'eau dans la nature est primordiale pour le biologiste aussi bien que pour le pédologue ou l'aménagiste. La comparaison du bilan hydrique dans un écosystème arboré et dans une formation herbacée placés dans les mêmes conditions climatiques, permet de montrer le rôle différentiel du couvert végétal dans le cycle de l'eau.

Le but de cette étude réalisée en 1971/72 et 73 est de déterminer certains éléments du bilan hydrique, bilan que l'on peut exprimer par la relation :

$$P = I_n + R \pm \Delta S + D + E$$

dans laquelle

$P$  = précipitation incidente au-dessus du peuplement.

$I_n$  = Interception nette par le couvert végétal.

$R$  = Pertes par ruissellement au sol.

$\Delta S$  = Variation de la réserve en eau du sol ( $RS$ ).

$D$  = Pertes par drainage.

$E$  = Pertes par évapotranspiration.

Le but de l'étude est aussi de comparer ces éléments en fonction du couvert végétal en établissant dans chaque cas, à l'aide d'un modèle empirique, le bilan hydrique théorique de l'écosystème.

## SITUATION DES PARCELLES ET DESCRIPTION

Une parcelle boisée en *Uapaca bojeri* et une parcelle herbeuse contiguë, d'environ 1 ha chacune, sises au lieu dit Andasy, canton de Behenjy, à 30 km

au sud de Tananarive, ont été mises en défens et aménagées en vue de la mesure du bilan hydrique (CORNET, 1974a).

## CLIMAT

La station située à 1.450 m d'altitude, dans le secteur dit des « Pentes Occidentales », s'étend sur un versant d'orientation Ouest-Sud-Ouest, dont la pente moyenne est de 12 %. Elle se trouve dans une zone à climat tropical austral d'altitude « sub-humide, à saison sèche atténuée par des brouillards » (CORNET, 1974b). Ce climat est marqué par l'absence quasi totale de pluie de mai à octobre, et par des précipitations abondantes mais irrégulières de novembre à avril. Il présente 7 mois de

saison sèche et un déficit hydrique climatique cumulé de 192 mm. Les caractéristiques climatiques moyennes ont été obtenues par les données de Tananarive pour les températures, de Behenjy pour la pluviométrie, ainsi que par celles fournies par la station météorologique du bassin versant de la Tafaina (ORSTOM-Hydrologie) qui jouxte la parcelle.

La température annuelle moyenne (1941/1960) est de 18,9 °C, la moyenne des maximums étant de

25,1 °C (novembre est le mois le plus chaud) et la moyenne des minimums de 12,6 °C (juillet est le mois le plus froid).

La moyenne des précipitations annuelles sur 25 ans est de 1.348,2 mm. Le tableau I montre la répartition mensuelle pour le poste de Behenjy.

TABEAU I

PRÉCIPITATIONS MENSUELLES en m/m (BEHENJY — Moyennes 1935/1960)

Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
275,7	233,4	235,8	47,0	17,3	7,1	10,7	8,6	15,6	54,4	168,2	269,4

### SOL

Le substrat géologique est constitué par du granite, apparaissant dans la partie haute de la parcelle sous forme de boules très érodées. La profondeur du sol est d'environ 3 à 4 m dans la parcelle boisée (parcelle 2) et de 5 à 10 m dans la parcelle herbeuse (parcelle 1) en contrebas. Le sol est « de type ferrallitique, fortement dessaturé et pénévolué, à texture

argilo-sableuse » (BOURGEAT, 1972). Le tableau II montre la composition granulométrique du sol des deux parcelles en %.

Le sol de la parcelle 1, montre une teneur nettement plus forte en argile entre 30 et 75 cm, ainsi qu'une décroissance moins rapide de cette teneur en profondeur.

TABEAU II

GRANULOMÉTRIE DU SOL %

Parcelle	Profondeur cm	Argile	Limon fin	Limon gros.	Sable fin	Sables gros.	Mat. Org.	Densité apparente
Parcelle 1 (herbeuse)	0-30	39,4	7,4	2,9	12,9	36,8	1,4	1,55
	30-75	41,4	6,0	4,0	9,0	37,6	0,3	1,50
	75-140	39,6	5,1	6,3	11,6	35,9		1,48
	140	29,6	17,7	11,8	14,2	24,7		1,56
Parcelle 2 (boisée)	0-20	37,3	8,7	3,7	12,7	37,6	1,1	1,53
	20-50	34,6	10,5	3,9	8,0	43,0	0,2	1,54
	50-200	23,9	10,1	7,3	11,5	47,2		1,46

### VÉGÉTATION

La parcelle boisée est couverte par une futaie assez claire, d'arbres tortueux, de 5 à 9 m de hauteur, recouvrant un sous-bois d'arbustes éricoides d'une hauteur de 1 m environ. La strate arborée est presque monospécifique, composée de « TAPIA », nom malgache de *Uapaca bojeri* dont le feuillage est permanent, mais s'éclaircit beaucoup en saison sèche.

La parcelle herbeuse est recouverte d'une pseudo-steppe secondaire à graminées vivaces : *Loudetia simplex* et *Aristida rufescens* surtout, parsemés çà et là de sous-arbrissaux éricoides ou de chlénacées. La strate herbacée discontinue, d'une hauteur de 50 à 70 cm en saison des pluies est réduite en saison sèche à l'état de « paillasson ».

# MÉTHODES UTILISÉES ET DISPOSITIF DE MESURES

## MESURES

La mesure des précipitations incidentes est effectuée par un pluviomètre placé à 1,50 m, en plein découvert, au milieu de la parcelle herbeuse. Les résultats obtenus sont comparables à ceux des pluviomètres du bassin versant limitrophe. Les précipitations arrivant directement au sol (ou égouttement) sont recueillies et mesurées à l'aide de 10 pluviomètres à accumulation de 400 cm<sup>2</sup> de surface réceptrice, répartis au hasard sous le couvert et relevés toutes les semaines. L'évaluation du ruissellement le long des troncs est réalisée grâce à 10 dispositifs constitués par une gouttière en matière plastique spiralée, fixée autour des troncs, l'étanchéité étant assurée par du mastic à aquarium. L'eau recueillie dans des fûts métalliques est mesurée toutes les semaines.

Dans les deux parcelles, l'humidité du sol a été mesurée à l'aide d'un humidimètre à neutrons de type C. E. A. Hp 310, mis gracieusement à notre disposition par le laboratoire des Radio-Isotopes de Tananarive\*.

L'étalonnage a été réalisé, d'une part, au laboratoire de Radio-Isotopes, par analyse des échantillons de sol et d'autre part, sur le terrain. Les mesures hebdomadaires étaient effectuées dans trois tubes répartis au hasard dans chaque parcelle, tous les 10 cm jusqu'à une profondeur de 2,50 m.

Les caractéristiques hydrodynamiques des sols, ont été déterminées *in situ* par infiltration et ressuyage contrôlé, grâce à l'humidimètre suivant la méthode proposée par POURRUT et ZEBROWSKI (1970).

## ANALYSE DES DONNÉES

Les mesures effectuées de novembre 1971 à novembre 1973 ont été analysées statistiquement, celles relatives à la parcelle boisée ont fait l'objet d'un précédent rapport (CORNET, 1974a).

Il nous a paru intéressant pour comparer les deux parcelles, d'établir le bilan hydrique théorique de chacune, grâce à l'utilisation d'un modèle de simulation et d'analyse du bilan hydrique. Ce travail a pu être effectué en juin 1976 aux Services Scientifiques Centraux, ORSTOM de Bondy\*\*.

Le bilan hydrique du sol consiste à établir les différents flux d'eau qui entrent ou sortent de ce dernier, pour déterminer au jour le jour (ou période par période) le déficit hydrique du sol. Pour l'établissement d'un modèle de ce bilan, il existe de nombreuses possibilités tant dans son élaboration, que dans son exploitation ultérieure. Il pourra être le plus élémentaire (simple bilan climatique par exemple) ou plus raffiné (FRANQUIN, 1973). Enfin l'élaboration du modèle peut correspondre à une approche empirique dans laquelle différents travaux

préalables fournissent des données expérimentales sur les relations entre les différents éléments, ou analytique, fondée sur des relations traduisant les processus réels. D'un modèle empirique au départ, on pourra passer progressivement à des modèles de plus en plus analytiques. Tout cela explique le nombre et la variété des modèles existants.

Celui qui a été utilisé est l'un des modèles ORSTOM de simulation et d'analyse fréquentielle du bilan hydrique. Il est empirique, donc en principe peu flexible. Une certaine souplesse d'adaptation lui est cependant conférée par des coefficients de réglage permettant de l'ajuster plus ou moins à des conditions spécifiques de sol ou de végétation.

Le modèle en question opère sur des pas de temps de 5, 7 ou 10 jours. Les pentades ou les décades pouvant être prises sous les deux acceptions, naturelles ou calendaires. Ici, nous avons utilisé un pas de 7 jours, correspondant à la fréquence des mesures.

## LES DONNÉES D'ENTRÉE DU MODÈLE

Ce sont :

— d'une part les précipitations arrivant au sol et les évapotranspirations potentielles, *E. T. P.*, ces dernières, dans le cas présent, ont été calculées à l'aide de la formule de TURC à par-

tir des données météorologiques de Tananarive, — d'autre part, la réserve utilisable maximale (*RU*) qui est caractéristique du sol et les coefficients de réglage *A* et *K*; le tableau III montre pour les deux parcelles les valeurs de la *RU*.

\* Nous tenons à remercier M. MOUTONNET P., ainsi que tout le personnel de son Laboratoire pour leur précieuse collaboration.

\*\* Nous remercions particulièrement M. P. FRANQUIN qui nous a initiés à cette méthode et nous a permis d'effectuer ce travail.

Le coefficient  $A$  intervient au niveau du sol, par modification des valeurs prises par l'humidité relative du sol ( $HR$ ).

$$HR \text{ ajustée} = \frac{HD}{RU} \pm A \quad (0 < A < 0,5)$$

où  $HD$  = eau disponible.

Le rôle du coefficient  $A$  est de rendre compte de l'effet des caractéristiques du sol sur la disponibilité de l'eau.

Le coefficient  $K$  opère au niveau de la plante et de l'atmosphère. Il module l'évapotranspiration réelle maximale  $ETM$  par rapport à l'évapotranspiration potentielle,  $ETP$ , selon le taux de recouvrement du sol.

Les éléments intermédiaires calculés sont :

- l'eau disponible  $HD$ ,
- l'humidité relative  $HR$ ,
- et l'évapotranspiration réelle maximale  $ETM$ .

TABLEAU III

CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES DES SOLS

Parcelles	Profondeur utilisée	Réserve à capacité de rétention	Réserves à $pF = 4,2$	$RU$
Parcelle 1	2,50	600 mm	404 mm	196 mm
Parcelle 2	2,50	555 mm	225 mm	330 mm

$pF$  est le point du flétrissement. Pour  $pF = 4,2$  on a le point de flétrissement permanent qui marque la limite de l'eau absorbable.

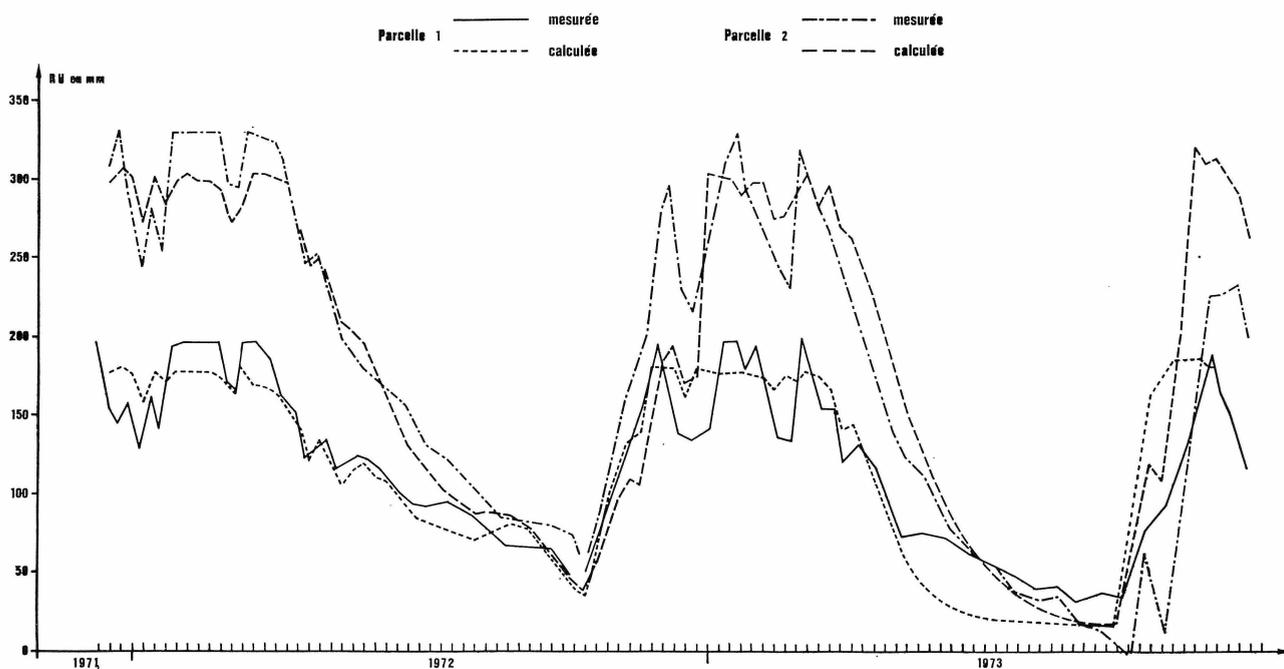
LES SORTIES

Ce sont tous les résultats qui présentent un intérêt opérationnel. Le plus important est l'évapotranspiration réelle  $ETR$  dont dépendent toutes les autres variables liées. La fonction d'évaluation de l' $ETR$  constitue dans le programme un bloc interchangeable. On utilise ici la fonction de EAGLEMAN (1971) où  $ETR$  est une fonction cubique de  $HR$ , dont les paramètres sont eux-mêmes fonction de  $ETP$  (FRANQUIN 1976). La réserve du sol ( $RS$ ) en fin

de chaque période permet, par comparaison avec la réserve réelle mesurée, de régler et de tester le modèle (voir graphique fig. 1).

L'excès d'eau par rapport à  $ETR$  et à  $RU$  est débité, soit en fin de pas de temps sous forme de drainage ( $DR$ ) soit en début, sous forme de ruissellement-drainage ( $RDR$ ). Actuellement le modèle ne permet pas de déterminer la part respective de ces deux éléments.

FIG.1 - ÉVOLUTION DE LA RÉSERVE DU SOL UTILISABLE



# RÉSULTATS

## LES PRÉCIPITATIONS ET LEUR DEVENIR

Dans la parcelle 1, parcelle herbeuse, nous avons considéré que les précipitations incidentes atteignent directement le sol, négligeant ainsi l'interception qui pourrait exister au niveau de la strate herbacée. Ces précipitations ont été de 288,0 mm du 7 décembre 1971 au 1<sup>er</sup> janvier 1972, de 1.661 mm en 1972 qui fut une année à pluviométrie excédentaire et de 1.376 mm du 1<sup>er</sup> janvier au 6 décembre 1973.

Dans la parcelle 2, les pluies incidentes n'atteignent pas directement le sol. Le couvert végétal en intercepte une partie qu'elle réévapore. Une partie atteint le sol à travers la couronne des arbres par égouttement. Une autre partie ruisselle le long des branches et du tronc avant d'atteindre le sol. On appelle interception brute (*IB*) la différence entre les précipitations incidentes et l'égouttement mesuré sous le couvert. Selon différents auteurs : AUSSENAK (1968) ; ETTEHAD *et al.* (1973) l'interception brute est fonction décroissante de l'intensité des précipitations. On appelle interception nette la différence entre les précipitations incidentes et les précipitations arrivées réellement au sol (égouttement plus écoulement le long des troncs). Dans cette étude, nous avons considéré les précipitations hebdomadaires réparties en 4 classes ; le tableau IV montre les valeurs obtenues.

Le calcul statistique montre que pour  $P < 10$  mm la valeur obtenue pour *IB* est significativement différente au seuil de 0,01 des valeurs obtenues pour les trois autres classes. Pour ces trois dernières, les valeurs d'interception brute ne sont pas significativement distinctes. Nous avons donc déterminé la valeur de *IB* pour *P* hebdomadaire supérieure à 10 mm.

$IB \% = 18,1 \pm 2,5$  des précipitations incidentes .

Le fait qu'une même valeur des précipitations hebdomadaires puisse recouvrir un nombre variable d'averses d'intensités différentes explique que l'on n'ait pas pu mettre en évidence de différences significatives dans le cas des 3 dernières classes.

Malgré un nombre important de mesures : 125 pour  $P < 10$  mm et 408 pour  $P > 10$  mm, les erreurs relatives sur l'interception brute sont élevées puisqu'elles représentent 17,5 % dans le premier cas et 13,8 % dans le second.

Pour des précipitations hebdomadaires inférieures à 10 mm le ruissellement le long des troncs *r* est non significativement différent de 0.

Pour des précipitations hebdomadaires supérieures à 10 mm  $r = 2,06 \pm 0,24$  % de la précipitation incidente.

TABLEAU IV

INTERCEPTION ET RUISSÈLEMENT LE LONG DES TRONCS POUR 4 CLASSES DE PRÉCIPITATIONS HEBDOMADAIRES (en % DES PRÉCIPITATIONS INCIDENTES)

P. Hebdomadaire.....	$P < 10$ mm	$10 < P < 50$	$50 < P < 100$	$P > 100$
Interception brute <i>IB</i> %.....	$44,3 \pm 7,8$	$18,9 \pm 3,5$	$16,9 \pm 6,1$	$17,6 \pm 4,5$
Ruissellement le long des troncs <i>r</i> %.....	0	$2,06 \pm 0,24$		
Interception nette <i>IN</i> %.....	$44,3 \pm 7,8$	$16,8 \pm 3,7$	$14,8 \pm 6,3$	$15,7 \pm 4,7$

## BILAN HYDRIQUE THÉORIQUE DU SOL

La mesure hebdomadaire de l'humidité du sol nous a permis de suivre l'évolution réelle de la réserve en eau du sol dans les deux parcelles. Pour établir le bilan hydrique, il faut pouvoir déterminer les deux inconnues qui n'ont pas été mesurées, le drainage (*DR*) et l'*ETR* et qui sont difficilement mesurables sur le terrain. L'utilisation d'un modèle, nous permet d'estimer *ETR* et le drainage, donc d'établir le bilan hydrique théorique pour chaque

parcelle. En comparant (voir fig. 1) la *RS* calculée et son évolution avec la réserve réelle mesurée, nous pouvons en modifiant les coefficients *A* et *K*, ajuster le modèle. Pour la parcelle 1, nous avons utilisé directement les pluies incidentes, alors que pour la parcelle boisée, nous avons utilisé les précipitations mesurées arrivant au sol (Egouttement + Ecoulement).

Les tableaux *A* et *B* en annexe donnent pour

*Un Tapia (Uapaca bojeri).*  
*Hauts-Plateaux. Madagascar.*

chaque semaine, les éléments calculés du bilan hydrique.

La figure 2, nous montre, comment se répartit pour chaque semaine la lame d'eau (p. 10).

On voit qu'au point de vue hydrique, l'année peut être divisée en 5 périodes d'inégales durées.

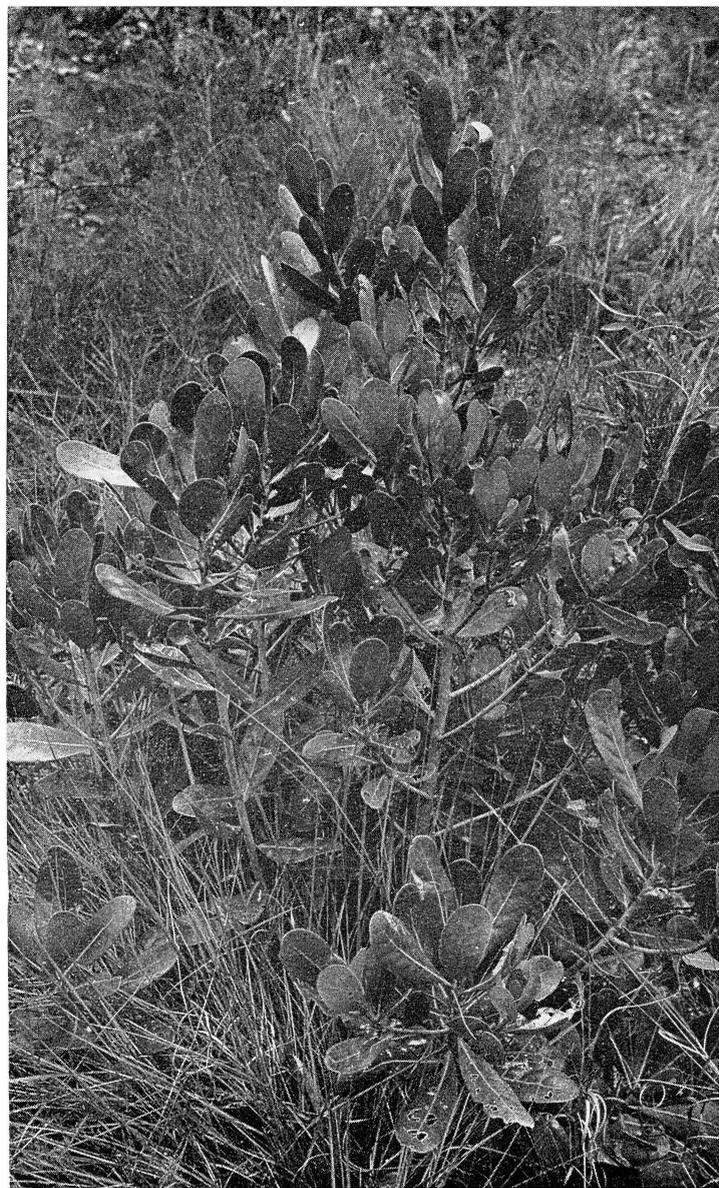
1) De janvier à mars, les pluies sont abondantes, le sol est humide, l'évapotranspiration est importante, le drainage également.

2) Avril et mai, les pluies se raréfient mais les températures sont encore élevées, l'évapotranspiration reste assez forte, la réserve d'eau du sol contribue activement à l'alimentation des plantes.

3) Juin à août, c'est la période froide avec de fréquents brouillards. La demande évaporatrice est plus faible. La végétation herbacée se dessèche progressivement pour être réduite à l'état de touffes dès le mois de juillet. La végétation arbustive perd une partie de ses feuilles, qui ne repousseront qu'en octobre. Elle continue cependant à transpirer en utilisant le reste d'eau du sol, *ETR* décroissant régulièrement avec la réserve en eau utilisable.

4) Septembre et octobre : élévation des températures et de la demande évaporatrice, pluies rares. La végétation herbacée ne démarre pas, son *ETR* est très faible. La strate arbustive émet des jeunes feuilles, son *ETR* est limitée par l'état des réserves du sol.

5) Novembre et décembre, les températures sont élevées et les pluies abondantes. La vie végétale est très active et les réserves du sol se reconstituent.



## CONCLUSION

La récapitulation des principaux éléments du bilan hydrique annuel est donnée par le tableau V.

TABLEAU V  
 PRINCIPAUX ÉLÉMENTS ANNUELS DU BILAN HYDRIQUE

Année	Parcelle		<i>P</i> arrivant au sol	<i>ETR</i>	Ruissellement + Drainage
1972	Herbeuse (1)	en mm.....	1.661,0	742,5	916,1
		en % de <i>P</i> incidente.....	100 %	44,7 %	55,2 %
	Boisée (2)	en mm.....	1.337,2	947,8	385,8
		en % de <i>P</i> incidente.....	80,5 %	57,1 %	23,2 %
1973	Herbeuse (1)	en mm.....	1.376,0	581,3	797,9
		en % de <i>P</i> incidente.....	100 %	42,2 %	57,9 %
	Boisée (2)	en mm.....	1.165,0	813,3	364,7
		en % de <i>P</i> incidente.....	84,7 %	59,1 %	26,5 %

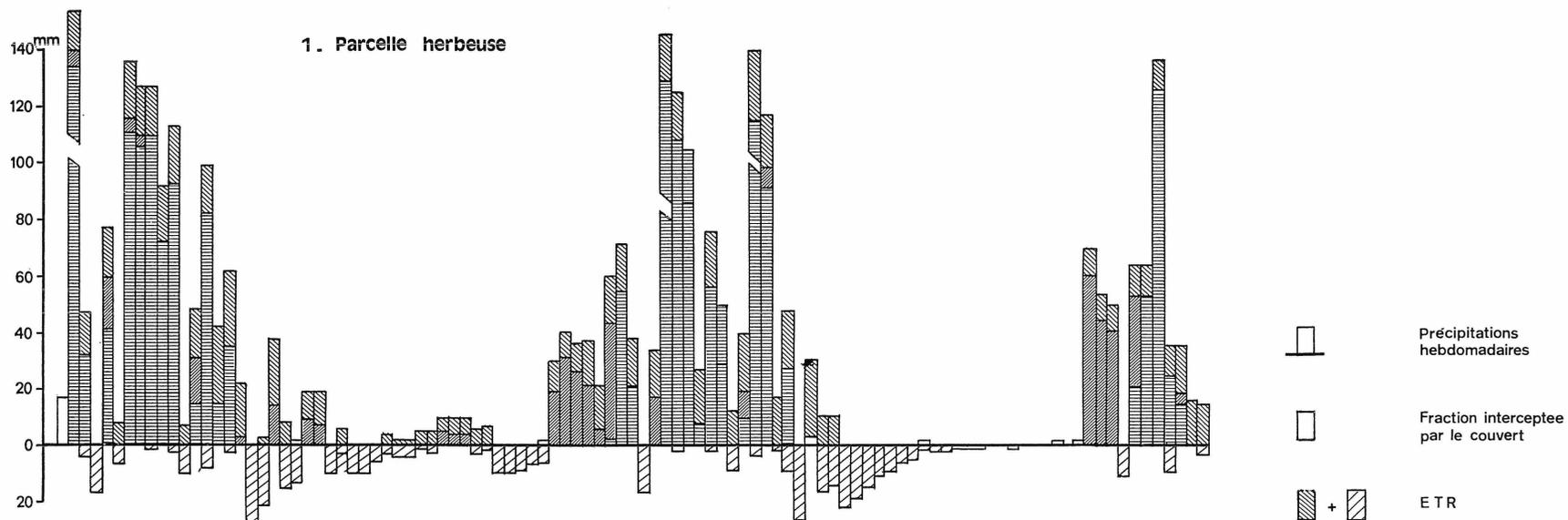
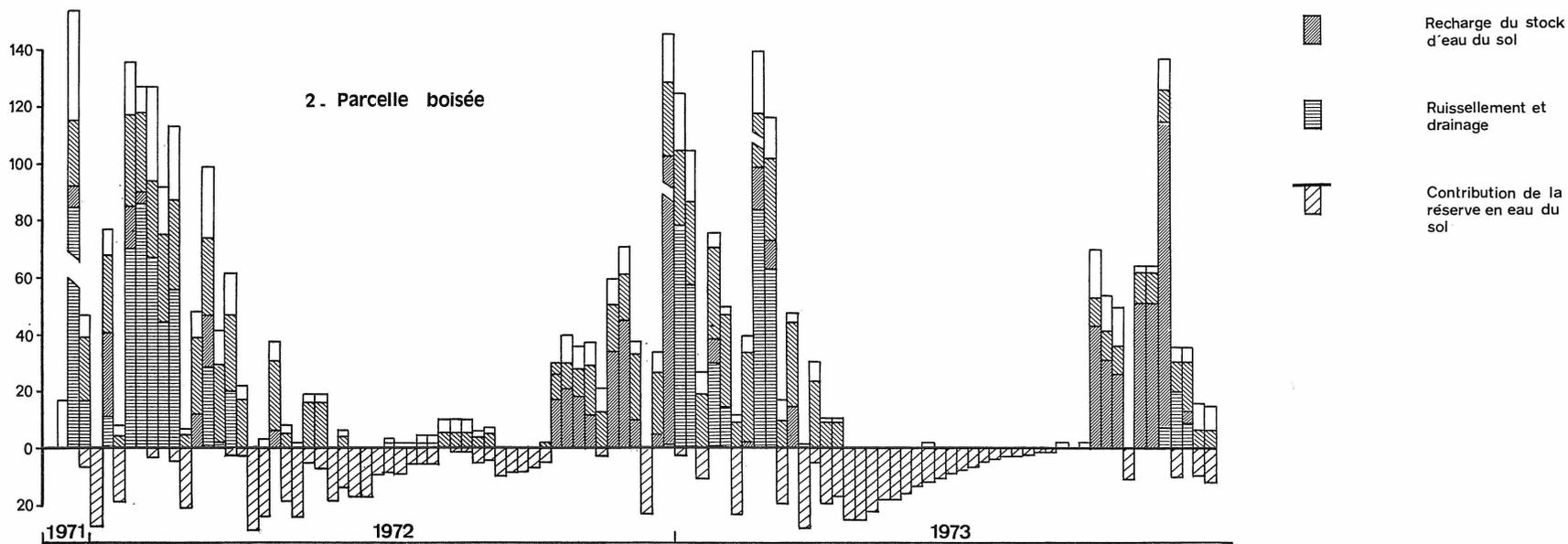


FIG.2 \_ BILAN HYDRIQUE THÉORIQUE DES DEUX PARCELLES



Il montre, que la végétation arbustive évapore entre 55 et 60 % des précipitations incidentes, alors que le couvert herbacé n'en évapore que 40 à 45 %. Cette différence s'accroît en année sèche. Les pertes par ruissellement et drainage sont très importantes dans le cas de la parcelle herbeuse où elles sont supérieures à 50 % de la pluie incidente contre 25 % dans le cas de la végétation arbustive.

Il serait nécessaire de pouvoir connaître les parts respectives du drainage et du ruissellement au sol, afin de saisir l'impact du boisement sur le bilan hydrique.

L'influence du boisement sur le ruissellement au sol a été étudiée par divers auteurs, soit à partir de parcelles élémentaires, soit à l'aide de petits bassins versants (GOUJON *et al.* 1968 ; BIROT et GALABERT 1969 ; BAILLY *et al.* 1974 ; BAILLY *et al.* 1976).

La lame d'eau interceptée par la végétation ligneuse (*In*) représente 16 à 20 % des précipitations

incidentes. Les valeurs sont faibles pour un peuplement sempervirent. Elles correspondent à celles obtenues par différents auteurs (AUSSENAC, 1968 ; RAPP et ROMANE, 1968) sur des peuplements feuillus d'Europe. L'écoulement le long de tronc est ici beaucoup plus faible 2 % au lieu de 4 à 6 %. Cette eau interceptée au niveau des couronnes est réévaaporée en quasi-totalité ; elle rentre donc dans l'évapotranspiration totale de l'écosystème arboré. Ainsi en 1972, la quantité totale d'eau évaporée par la parcelle boisée est de 1.271,6 mm contre 742,5 mm pour la parcelle herbeuse. La présence d'une végétation arborée augmente dans les mêmes conditions climatiques, la part du rayonnement utilisé pour l'évaporation de l'eau. Il s'ensuit que dans un peuplement arbustif de vaste surface le flux de chaleur sensible est moindre, donc la température de l'air plus basse par rapport aux zones herbeuses.

#### BIBLIOGRAPHIE

- AUSSENAC (G.), 1968. — Interception des précipitations par le couvert forestier, *Ann. Sci. forest.* 25 (3), p. 135-156.
- BAILLY (C.), BENOIT DE COGNAC (G.), MALVOS (C.), NINGRE (J.-M.) et SARRAILH (J.-M.), 1974. — Etude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar. Expérimentation en bassins versants élémentaires, *Cahiers Scientifiques*, n° 4, B. F. T.
- BAILLY (C.), MALVOS (C.), SARRAILH (J.-M.), RAKOTOMANANA (J.-L.), RAMPANA (L.) et RAMANAHADRAY (M.), 1976. — Etude de la sensibilité des sols de Madagascar à l'érosion. Expérimentations en parcelles élémentaires. *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 169, p. 15 à 27.
- BIROT (Y.) et GALABERT, 1969. — Economie de l'eau et travail du sol dans les plantations forestières de zone sèche. Application à la zone sahélo-soudanaise. *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 128, p. 23 à 37.
- BOURGEAT (F.), 1972. — Sols sur socle ancien à Madagascar. Mémoire ORSTOM, n° 57, 335 p.
- CORNET (A.), 1974a. — Etude de quelques éléments du bilan hydrique dans un écosystème arboré du secteur des pentes occidentales à Madagascar. Rapp. ORSTOM, Dakar, 14 p. Ronéo.
- CORNET (A.), 1974b. — Essai de cartographie bioclimatique à Madagascar. Cartes thématiques ORSTOM n° 55, 28 p. + Annexes + 1 carte 1/2.000 000<sup>e</sup>.
- EAGLEMAN (J. R.), 1971. — An experimentally derived model for actual evapo-transpiration. *Agric. Meteor.*, 8 (4/5), p. 385-394.
- ETTEHAD (R.), LOSSAINT (P.) et RAPP (M.), 1973. — Recherches sur la dynamique et le bilan de l'eau des sols de deux écosystèmes méditerranéens à chêne vert. P. B. I., R. C. P. du C. N. R. S., n° 40, Extraits du vol. III, p. 129-288.
- FRANQUIN (P.), 1973. — Les analyses fréquentielles du déficit hydrique et des pluies pour l'irrigation de complément. *Agron. Trop.*, vol. XXVIII, n° 9, septembre 1973, p. 853-854.
- FRANQUIN (P.) et FOREST (F.), 1976. — Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique, 6 p., à paraître.
- GOUJON, BAILLY (C.), de VERGNETTE (J.), BENOIT de COGNAC (G.), ROCHE, 1968. — Conservation des sols en Afrique et à Madagascar : seconde partie : Influence du couvert végétal sur le ruissellement et les pertes en terre. Résultats obtenus à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques* n° 119, p. 3 à 27.
- POURRUT (P.) et ZEBROWSKI (C.), 1970. — Détermination de certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols par utilisation de méthodes neutroniques en République Malgache. Cah. ORSTOM. Sér. Hydrol., vol. VII, n° 1, 1970, p. 37-64.
- RAPP (M.) et ROMANE (F.), 1968. — Egouttement des précipitations sous des peuplements de *Quercus ilex* L. et de *Pinus halepensis* Mill., *Oecol. Plant* 3, n° 4, p. 271-284.





PERIODES	P	I	MD	HR	ETP	K	ETM	ETR	RS	DR	DRC	D(RS)	D(RS)/RU	ETR/ETM	ETM-ETR		
*	1	125.0	.0	196.0	.85	31.0	.60	18.6	18.6	177.4	108.2	108.2	18.6	.09	1.00	.0	*
*	2	105.0	.0	196.0	.85	32.0	.60	19.2	19.2	176.8	86.4	194.6	19.2	.10	1.00	.0	*
*	3	27.0	.0	196.0	.85	32.0	.60	19.2	19.2	176.8	7.8	202.4	19.2	.10	1.00	.0	*
*	4	76.0	.0	196.0	.85	35.0	.60	21.0	21.0	175.0	56.8	259.2	21.0	.11	1.00	.0	*
*	5	50.0	.0	196.0	.85	35.0	.60	21.0	21.0	175.0	29.0	288.2	21.0	.11	1.00	.0	*
*	6	12.0	.0	187.0	.80	35.0	.60	21.0	21.0	166.0	.0	288.2	30.0	.15	1.00	.0	*
*	7	40.0	.0	196.0	.85	35.0	.60	21.0	21.0	175.0	10.0	298.2	21.0	.11	1.00	.0	*
*	8	160.0	.0	196.0	.85	42.0	.60	25.2	25.2	170.8	139.0	437.2	25.2	.13	1.00	.0	*
*	9	117.0	.0	196.0	.85	31.0	.60	18.6	18.6	177.4	91.8	529.0	18.6	.09	1.00	.0	*
*	10	17.0	.0	194.4	.84	32.0	.60	19.2	19.2	175.2	.0	529.0	20.8	.11	1.00	.0	*
*	11	48.0	.0	196.0	.85	32.0	1.00	32.0	29.8	166.2	27.2	556.2	29.8	.15	.93	2.2	*
*	12	1.0	.0	167.2	.70	31.0	1.00	31.0	27.6	139.6	.0	556.2	56.4	.29	.89	3.4	*
*	13	31.0	.0	170.6	.72	31.0	1.00	31.0	27.8	142.8	.0	556.2	53.2	.27	.90	3.2	*
*	14	10.5	.0	153.3	.63	32.0	1.00	32.0	27.3	126.0	.0	556.2	70.0	.36	.85	4.7	*
*	15	10.5	.0	136.5	.55	30.0	1.00	30.0	24.7	111.9	.0	556.2	84.1	.43	.82	5.3	*
*	16	.0	.0	111.9	.42	30.0	1.00	30.0	21.9	89.9	.0	556.2	106.1	.54	.73	8.1	*
*	17	.0	.0	89.9	.31	34.0	1.00	34.0	18.8	71.2	.0	556.2	124.8	.64	.55	15.2	*
*	18	.0	.0	71.2	.21	30.0	1.00	30.0	14.9	56.3	.0	556.2	139.7	.71	.50	15.1	*
*	19	.0	.0	56.3	.14	21.0	.50	10.5	10.5	45.8	.0	556.2	150.2	.77	1.00	.0	*
*	20	.0	.0	45.8	.08	24.0	.50	12.0	8.8	36.9	.0	556.2	159.1	.81	.73	3.2	*
*	21	.0	.0	36.9	.04	24.0	.50	12.0	6.3	30.6	.0	556.2	165.4	.84	.52	5.7	*
*	22	.0	.0	30.6	.01	24.0	.50	12.0	4.3	26.3	.0	556.2	169.7	.87	.36	7.7	*
*	23	2.0	.0	28.3	-.01	24.0	.50	12.0	3.6	24.8	.0	556.2	171.2	.87	.30	8.4	*
*	24	.0	.0	24.8	-.02	21.0	.50	10.5	2.5	22.2	.0	556.2	173.8	.89	.24	8.0	*
*	25	.0	.0	22.2	-.04	21.0	.50	10.5	1.7	20.6	.0	556.2	175.4	.89	.16	8.8	*
*	26	.0	.0	20.6	-.04	24.0	.30	7.2	.8	19.8	.0	556.2	176.2	.90	.12	6.4	*
*	27	.0	.0	19.8	-.05	18.0	.30	5.4	1.1	18.6	.0	556.2	177.4	.90	.21	4.3	*
*	28	.0	.0	18.6	-.05	18.0	.30	5.4	.7	17.9	.0	556.2	178.1	.91	.13	4.7	*
*	29	.0	.0	17.9	-.06	21.0	.30	6.3	.1	17.8	.0	556.2	178.2	.91	.02	6.2	*
*	30	.0	.0	17.8	-.06	24.0	.30	7.2	.0	17.8	.0	556.2	178.2	.91	.01	7.1	*
*	31	.0	.0	17.8	-.06	15.0	.30	4.5	.9	16.9	.0	556.2	179.1	.91	.20	3.6	*
*	32	.0	.0	16.9	-.06	18.0	.30	5.4	.1	16.8	.0	556.2	179.2	.91	.02	5.3	*
*	33	.0	.0	16.8	-.06	24.0	.30	7.2	.0	16.7	.0	556.2	179.3	.91	.01	7.1	*
*	34	.0	.0	16.7	-.06	24.0	.30	7.2	.0	16.7	.0	556.2	179.3	.91	.01	7.1	*
*	35	1.0	.0	17.7	-.06	24.0	.30	7.2	.0	17.6	.0	556.2	178.4	.91	.01	7.1	*
*	36	.0	.0	17.6	-.06	24.0	.30	7.2	.0	17.6	.0	556.2	178.4	.91	.01	7.1	*
*	37	1.0	.0	18.6	-.06	32.0	.30	9.6	.0	18.5	.0	556.2	177.5	.91	.01	9.5	*
*	38	70.0	.0	88.5	.30	32.0	.30	9.6	9.6	78.9	.0	556.2	117.1	.60	1.00	.0	*
*	39	54.0	.0	132.9	.53	32.0	.30	9.6	9.6	123.3	.0	556.2	72.7	.37	1.00	.0	*
*	40	50.0	.0	173.3	.73	32.0	.30	9.6	9.6	163.7	.0	556.2	32.3	.16	1.00	.0	*
*	41	.0	.0	163.7	.69	35.0	.30	10.5	10.5	153.2	.0	556.2	42.8	.22	1.00	.0	*
*	42	64.0	.0	196.0	.85	35.0	.30	10.5	10.5	185.5	21.2	577.4	10.5	.05	1.00	.0	*
*	43	64.0	.0	196.0	.85	35.0	.30	10.5	10.5	185.5	53.5	630.9	10.5	.05	1.00	.0	*
*	44	137.0	.0	196.0	.85	35.0	.30	10.5	10.5	185.5	126.5	757.4	10.5	.05	1.00	.0	*
*	45	36.0	.0	196.0	.85	42.0	.50	21.0	21.0	175.0	25.5	782.9	21.0	.11	1.00	.0	*
*	46	36.0	.0	196.0	.85	35.0	.50	17.5	17.5	178.5	15.0	797.9	17.5	.09	1.00	.0	*
*	47	16.0	.0	194.5	.84	31.0	.50	15.5	15.5	179.0	.0	797.9	17.0	.09	1.00	.0	*
*	48	15.0	.0	194.0	.84	36.0	.50	18.0	18.0	176.0	.0	797.9	20.0	.10	1.00	.0	*
*	49	.0	.0	176.0	.75	31.0	.60	18.6	18.6	157.4	.0	797.9	38.6	.20	1.00	.0	*
*	50	.0	.0	157.4	.65	28.0	.60	16.8	16.8	140.6	.0	797.9	55.4	.28	1.00	.0	*
*	51	.0	.0	140.6	.57	28.0	.60	16.8	16.8	123.8	.0	797.9	72.2	.37	1.00	.0	*
*	52	.0	.0	123.8	.48	28.0	.60	16.8	16.8	107.0	.0	797.9	89.0	.45	1.00	.0	*

11

PERIODFS	P	I	HD	HR	FTP	K	ETM	ETR	RS	DR	DRC	D(RS)	D(RS)/RU	ETR/ETM	ETM-ETR		
*	1	.0	.0	299.9	.81	29.0	1.00	29.0	26.9	273.0	.0	.0	57.0	.17	.93	2.1	*
*	2	67.8	.0	330.0	.90	29.0	1.00	29.0	27.4	302.6	10.8	10.8	27.4	.08	.94	1.6	*
*	3	4.1	.0	306.7	.83	25.0	1.00	25.0	23.7	283.0	.0	10.8	47.0	.14	.95	1.3	*
*	4	116.6	.0	330.0	.90	34.0	1.00	34.0	31.9	298.1	69.6	80.4	31.9	.10	.94	2.1	*
*	5	117.7	.0	330.0	.90	29.0	1.00	29.0	27.4	302.6	85.8	166.1	27.4	.08	.94	1.6	*
*	6	94.2	.0	330.0	.90	33.0	1.00	33.0	31.0	299.0	66.8	232.9	31.0	.09	.94	2.0	*
*	7	75.5	.0	330.0	.90	33.0	1.00	33.0	31.0	299.0	44.5	277.4	31.0	.09	.94	2.0	*
*	8	87.2	.0	330.0	.90	38.0	1.00	38.0	35.7	294.3	56.2	333.6	35.7	.11	.94	2.3	*
*	9	4.8	.0	299.1	.81	28.0	1.00	28.0	26.1	273.0	.0	333.6	57.0	.17	.93	1.9	*
*	10	38.7	.0	311.7	.84	29.0	1.00	29.0	27.1	284.6	.0	333.6	45.4	.14	.94	1.9	*
*	11	74.3	.0	330.0	.90	29.0	1.00	29.0	27.4	302.6	28.9	362.5	27.4	.08	.94	1.6	*
*	12	29.3	.0	330.0	.90	29.0	1.00	29.0	27.4	302.6	1.9	364.4	27.4	.08	.94	1.6	*
*	13	47.3	.0	330.0	.90	32.0	1.00	32.0	30.1	299.9	19.9	384.3	30.1	.09	.94	1.9	*
*	14	17.1	.0	317.0	.86	20.0	1.00	20.0	19.7	297.3	.0	384.3	32.7	.10	.98	.3	*
*	15	.0	.0	297.3	.80	31.0	1.00	31.0	28.6	268.8	.0	384.3	61.2	.19	.92	2.4	*
*	16	1.2	.0	270.0	.72	27.0	1.00	27.0	24.8	245.2	.0	384.3	84.8	.26	.92	2.2	*
*	17	30.9	.0	276.1	.74	27.0	1.00	27.0	24.9	251.2	.0	384.3	78.8	.24	.92	2.1	*
*	18	5.3	.0	256.5	.68	27.0	1.00	27.0	24.5	232.0	.0	384.3	98.0	.30	.91	2.5	*
*	19	.8	.0	232.8	.61	29.0	1.00	29.0	25.0	207.8	.0	384.3	122.2	.37	.86	4.0	*
*	20	15.9	.0	223.7	.58	22.0	1.00	22.0	20.6	203.1	.0	384.3	126.9	.38	.94	1.4	*
*	21	15.9	.0	219.0	.56	26.0	1.00	26.0	22.8	196.1	.0	384.3	133.9	.41	.88	3.2	*
*	22	.0	.0	196.1	.49	19.0	1.00	19.0	18.4	177.7	.0	384.3	152.3	.46	.97	.6	*
*	23	4.1	.0	181.8	.45	19.0	1.00	19.0	18.1	163.8	.0	384.3	166.2	.50	.95	.9	*
*	24	.0	.0	163.8	.40	19.0	1.00	19.0	17.5	146.3	.0	384.3	183.7	.56	.92	1.5	*
*	25	.0	.0	146.3	.34	19.0	1.00	19.0	16.7	129.6	.0	384.3	200.4	.61	.88	2.3	*
*	26	.0	.0	129.6	.29	19.0	.50	9.5	9.5	120.1	.0	384.3	209.9	.64	1.00	.0	*
*	27	1.3	.0	121.4	.27	19.0	.50	9.5	9.5	111.9	.0	384.3	218.1	.66	1.00	.0	*
*	28	.7	.0	112.6	.24	19.0	.50	9.5	9.5	103.1	.0	384.3	226.9	.69	1.00	.0	*
*	29	.8	.0	103.9	.21	19.0	.30	5.7	5.7	98.2	.0	384.3	231.8	.70	1.00	.0	*
*	30	1.5	.0	99.7	.20	21.0	.30	6.3	6.3	93.4	.0	384.3	236.6	.72	1.00	.0	*
*	31	1.5	.0	94.9	.19	24.0	.30	7.2	7.2	87.7	.0	384.3	242.3	.73	1.00	.0	*
*	32	5.8	.0	93.5	.18	18.0	.30	5.4	5.4	88.1	.0	384.3	241.9	.73	1.00	.0	*
*	33	5.8	.0	93.9	.18	21.0	.30	6.3	6.3	87.6	.0	384.3	242.4	.73	1.00	.0	*
*	34	5.8	.0	93.4	.18	21.0	.30	6.3	6.3	87.1	.0	384.3	242.9	.74	1.00	.0	*
*	35	4.0	.0	91.1	.18	29.0	.30	8.7	8.7	82.4	.0	384.3	247.6	.75	1.00	.0	*
*	36	5.0	.0	87.4	.16	29.0	.30	8.7	8.7	78.7	.0	384.3	251.3	.76	1.00	.0	*
*	37	.0	.0	78.7	.14	33.0	.30	9.9	9.9	68.8	.0	384.3	261.2	.79	1.00	.0	*
*	38	.0	.0	68.8	.11	33.0	.30	9.9	9.7	59.2	.0	384.3	270.8	.82	.97	.2	*
*	39	.0	.0	59.2	.08	31.0	.30	9.3	8.3	50.9	.0	384.3	279.1	.85	.89	1.0	*
*	40	.5	.0	51.4	.06	26.0	.30	7.8	7.2	44.1	.0	384.3	285.9	.87	.93	.6	*
*	41	.8	.0	44.9	.04	34.0	.30	10.2	5.5	39.4	.0	384.3	290.6	.88	.54	4.7	*
*	42	26.0	.0	65.4	.10	34.0	.30	10.2	9.0	56.4	.0	384.3	273.6	.83	.88	1.2	*
*	43	30.0	.0	86.4	.16	29.0	.30	8.7	8.7	77.7	.0	384.3	252.3	.76	1.00	.0	*
*	44	28.0	.0	105.7	.22	33.0	.30	9.9	9.9	95.8	.0	384.3	234.2	.71	1.00	.0	*
*	45	28.8	.0	124.6	.28	33.0	.50	16.5	16.5	108.1	.0	384.3	221.9	.67	1.00	.0	*
*	46	13.0	.0	121.1	.27	33.0	.50	16.5	16.5	104.6	.0	384.3	225.4	.68	1.00	.0	*
*	47	50.7	.0	155.3	.37	33.0	.50	16.5	16.5	138.8	.0	384.3	191.2	.58	1.00	.0	*
*	48	61.1	.0	199.9	.51	33.0	.50	16.5	16.5	183.4	.0	384.3	146.6	.44	1.00	.0	*
*	49	33.5	.0	216.9	.56	28.0	1.00	28.0	23.8	193.1	.0	384.3	136.9	.41	.85	4.2	*
*	50	.0	.0	193.1	.49	28.0	1.00	28.0	22.7	170.4	.0	384.3	159.6	.48	.81	5.3	*
*	51	26.4	.0	196.8	.50	28.0	1.00	28.0	22.9	174.0	.0	384.3	156.0	.47	.82	5.1	*
*	52	157.5	.0	330.0	.90	28.0	1.00	28.0	26.5	303.5	1.5	385.8	26.5	.08	.95	1.5	*

PERIODES :	P	I	HD	HR	ETP	K	ETM	ETR	RS	DR	DRC	D(RS)	D(RS)/RU	ETR/ETM	ETM-ETR	
*	1	105.1	.0	330.0	.90	31.0	31.0	29.2	300.8	78.6	78.6	29.2	.09	.94	1.8	*
*	2	87.2	.0	330.0	.90	32.0	32.0	30.1	299.9	58.0	136.6	30.1	.09	.94	1.9	*
*	3	19.0	.0	318.9	.87	32.0	32.0	29.9	289.0	.0	136.6	41.0	.12	.93	2.1	*
*	4	71.3	.0	330.0	.90	35.0	35.0	32.9	297.1	30.3	166.9	32.9	.10	.94	2.1	*
*	5	47.4	.0	330.0	.90	35.0	35.0	32.9	297.1	14.5	181.4	32.9	.10	.94	2.1	*
*	6	9.0	.0	306.1	.83	35.0	35.0	32.3	273.9	.0	181.4	56.1	.17	.92	2.7	*
*	7	34.1	.0	308.0	.83	35.0	35.0	32.3	275.6	.0	181.4	54.4	.16	.92	2.7	*
*	8	138.2	.0	330.0	.90	42.0	42.0	39.6	290.4	83.8	265.2	39.6	.12	.94	2.4	*
*	9	102.1	.0	330.0	.90	31.0	31.0	29.2	300.8	62.5	327.8	29.2	.09	.94	1.8	*
*	10	10.4	.0	311.2	.84	32.0	32.0	29.7	281.5	.0	327.8	48.5	.15	.93	2.3	*
*	11	44.6	.0	326.1	.89	32.0	32.0	30.0	296.0	.0	327.8	34.0	.10	.94	2.0	*
*	12	.5	.0	296.5	.80	31.0	31.0	28.5	268.0	.0	327.8	62.0	.19	.92	2.5	*
*	13	23.7	.0	291.7	.78	31.0	31.0	28.4	263.3	.0	327.8	66.7	.20	.92	2.6	*
*	14	9.0	.0	272.3	.73	32.0	32.0	28.6	243.7	.0	327.8	86.3	.26	.89	3.4	*
*	15	9.0	.0	252.7	.67	30.0	30.0	26.4	226.2	.0	327.8	103.8	.31	.88	3.6	*
*	16	.0	.0	226.2	.59	30.0	30.0	25.3	200.9	.0	327.8	129.1	.39	.84	4.7	*
*	17	.0	.0	200.9	.51	34.0	34.0	25.5	175.4	.0	327.8	154.6	.47	.75	8.5	*
*	18	.0	.0	175.4	.43	30.0	30.0	22.2	153.2	.0	327.8	176.8	.54	.74	7.8	*
*	19	.0	.0	153.2	.36	21.0	21.0	17.8	135.3	.0	327.8	194.7	.59	.85	3.2	*
*	20	.0	.0	135.3	.31	24.0	24.0	17.6	117.8	.0	327.8	212.2	.64	.73	6.4	*
*	21	.0	.0	117.8	.26	24.0	24.0	16.0	101.7	.0	327.8	228.3	.69	.67	8.0	*
*	22	.0	.0	101.7	.21	24.0	24.0	14.4	87.3	.0	327.8	242.7	.74	.60	9.6	*
*	23	.4	.0	87.7	.17	24.0	24.0	12.7	75.0	.0	327.8	255.0	.77	.53	11.3	*
*	24	.0	.0	75.0	.13	21.0	21.0	10.8	64.2	.0	327.8	265.8	.81	.51	10.2	*
*	25	.0	.0	64.2	.09	21.0	21.0	9.3	54.9	.0	327.8	275.1	.83	.44	11.7	*
*	26	.0	.0	54.9	.07	24.0	12.0	7.9	47.0	.0	327.8	283.0	.86	.66	4.1	*
*	27	.0	.0	47.0	.04	18.0	9.0	6.6	40.5	.0	327.8	289.5	.88	.73	2.4	*
*	28	.0	.0	40.5	.02	18.0	9.0	5.5	35.0	.0	327.8	295.0	.89	.61	3.5	*
*	29	.0	.0	35.0	.01	21.0	6.3	4.4	30.5	.0	327.8	299.5	.91	.70	1.9	*
*	30	.0	.0	30.5	-.01	24.0	7.2	3.4	27.1	.0	327.8	302.9	.92	.47	3.8	*
*	31	.0	.0	27.1	-.02	15.0	4.5	3.4	23.7	.0	327.8	306.3	.93	.75	1.1	*
*	32	.0	.0	23.7	-.03	18.0	5.4	2.5	21.2	.0	327.8	308.8	.94	.46	2.9	*
*	33	.0	.0	21.2	-.04	24.0	7.2	1.5	19.7	.0	327.8	310.3	.94	.21	5.7	*
*	34	.0	.0	19.7	-.04	24.0	7.2	1.2	18.6	.0	327.8	311.4	.94	.16	6.0	*
*	35	.5	.0	19.1	-.04	24.0	7.2	1.0	18.0	.0	327.8	312.0	.95	.14	6.2	*
*	36	.0	.0	18.0	-.05	24.0	7.2	.8	17.2	.0	327.8	312.8	.95	.11	6.4	*
*	37	.4	.0	17.6	-.05	32.0	9.6	.5	17.1	.0	327.8	312.9	.95	.05	9.1	*
*	38	53.0	.0	70.1	.11	32.0	9.6	9.6	60.5	.0	327.8	269.5	.82	1.00	.0	*
*	39	41.0	.0	101.5	.21	32.0	9.6	9.6	91.9	.0	327.8	238.1	.72	1.00	.0	*
*	40	35.8	.0	127.7	.29	32.0	9.6	9.6	118.1	.0	327.8	211.9	.64	1.00	.0	*
*	41	.0	.0	118.1	.26	35.0	10.5	10.5	107.6	.0	327.8	222.4	.67	1.00	.0	*
*	42	62.2	.0	169.8	.41	35.0	10.5	10.5	159.3	.0	327.8	170.7	.52	1.00	.0	*
*	43	62.3	.0	221.6	.57	35.0	10.5	10.5	211.1	.0	327.8	118.9	.36	1.00	.0	*
*	44	126.3	.0	330.0	.90	35.0	10.5	10.5	319.5	7.4	335.2	10.5	.03	1.00	.0	*
*	45	30.5	.0	330.0	.90	42.0	21.0	21.0	309.0	20.0	355.2	21.0	.06	1.00	.0	*
*	46	30.5	.0	330.0	.90	35.0	17.5	17.5	312.5	9.5	364.7	17.5	.05	1.00	.0	*
*	47	5.9	.0	318.4	.86	31.0	15.5	15.5	302.9	.0	364.7	27.1	.08	1.00	.0	*
*	48	5.6	.0	308.5	.83	36.0	18.0	18.0	290.5	.0	364.7	39.5	.12	1.00	.0	*
*	49	.0	.0	290.5	.78	31.0	31.0	28.4	262.1	.0	364.7	67.9	.21	.92	2.6	*
*	50	.0	.0	262.1	.69	28.0	28.0	25.3	236.8	.0	364.7	93.2	.28	.90	2.7	*
*	51	.0	.0	236.8	.62	28.0	28.0	24.6	212.2	.0	364.7	117.8	.36	.88	3.4	*
*	52	.0	.0	212.2	.54	28.0	28.0	23.6	188.6	.0	364.7	141.4	.43	.84	4.4	*

TOTAUX 1165.0 .0 1510.0 1098.6 915.2 183.4