

Evaporation du sol nu et répartition des pluies. Relations établies en Tunisie à partir des résultats des cases lysimétriques

Ch. RIOU
Maître de Recherches Principal de l'ORSTOM
Institut National Agronomique de Tunis

RÉSUMÉ

L'évaporation du sol nu a été mesurée à partir de cases lysimétriques, pendant plusieurs années à Tunis, par Yankovitch ; ce travail en propose une évaluation à partir d'éléments climatiques usuels : hauteurs et nombres de jours de pluie mensuels, évaporation potentielle.

Différents procédés de calcul ont été utilisés, s'inspirant des résultats fondamentaux ; l'un d'eux s'est révélé satisfaisant et a permis d'évaluer l'évaporation du sol nu dans les régions de Tunis et Sfax, pour des sols différents.

ABSTRACT

Yankovitch has been measuring at Tunis, for several years, bare soil evaporation by lysimeters ; this work offers an evaluation using usual climatic elements : monthly rain days and quantities, potential evaporation.

Several calculations have been tested, using fundamental results ; the best of them is then used to estimate bare soil evaporation for different tunisian places.

*
* *

Le problème de l'évaporation du sol nu présente un intérêt indéniable en zone méditerranéenne, d'une part parce que la jachère travaillée entre encore dans certains assolements et il est intéressant alors d'évaluer la quantité d'eau ainsi gagnée, d'autre part parce que dans les régions où la pluie est peu abondante, la culture arbustive est possible, grâce à une dispersion des arbres sur le terrain mettant à la disposition de chaque arbre une surface réceptrice de pluie et un volume de sol importants ; les pertes par évaporation du sol nu privent alors la végétation d'une quantité d'eau plus ou moins grande. Plus généralement, il peut être utile d'évaluer l'évaporation de zones dénudées dans l'étude du bilan hydrique de bassins versants.

Le but de cet article est essentiellement d'évaluer cette évaporation à partir d'un petit nombre de paramètres climatiques en utilisant la méthode statistique.

1. DONNÉES PHYSIQUES SUR L'ÉVAPORATION DU SOL NU

La plupart des études menées sur ce thème ont été effectuées en laboratoire et les auteurs distinguent généralement deux phases. Tout d'abord la chute d'énergie libre de l'eau à la surface du sol pendant le dessèchement n'entraîne pas une réduction notable de la pression de vapeur d'eau saturante et l'évaporation se maintient à son taux maximum, on peut parler alors d'évaporation potentielle E_0 , limitée uniquement par l'environnement climatique. Ensuite, la pression de vapeur d'eau à la surface tend à se rapprocher de celle de l'atmosphère au contact du

sol et il se produit une diminution de l'évaporation par rapport à E_0 , (FISHER, W. R. GARDNER, PEARSE, WIEGAND et TAYLOR, HILLEL etc.).

Les conclusions divergent par contre quand il s'agit d'évaluer avec précision des pertes d'eau au cours de ces deux phases.

Nous nous limiterons ici à quelques résultats expérimentaux, en insistant sur ceux d'entre eux qui ont été obtenus dans les conditions naturelles.

- 1) VERNET à la suite d'une étude au champ, note que la 1^{re} phase s'interrompt quand le sol a perdu une certaine quantité d'eau k , peu variable en toutes saisons.

Cette phase dure d'autant plus longtemps que l'évaporation potentielle E_0 est plus faible (COVE, GARDNER, HILLEL). Ces résultats sont cohérents, mais au champ, la 1^{re} phase est beaucoup plus courte (moins de 4 jours) que ne le laissent prévoir les résultats du laboratoire. Enfin, si la quantité d'eau perdue k varie avec E_0 , c'est au champ, dans un faible intervalle, augmentant plutôt avec E_0 , alors que les travaux de GARDNER et HILLEL en laboratoire suggèrent l'inverse ainsi que de fortes variations de k . Les conditions initiales ne sont cependant pas les mêmes, le sol passant dans les conditions naturelles par des phases de saturation puis de ressuyage.

- 2) Pendant la deuxième phase, l'évaporation cumulée ΣE suit une loi parabolique en \sqrt{t} d'après GARDNER, KLUTE et HILLEL (t étant le temps cumulé). VERNET, dans les conditions naturelles, trouve un résultat proche, mais cette fois ΣE varie comme $\sqrt{\Sigma E_0}$. Cette distorsion s'explique peut-être ; un dessèchement rapide du sol peut entraîner une rupture dans la diffusion de l'eau des couches profondes vers la surface. On peut montrer alors aisément que l'eau perdue étant entièrement empruntée aux couches superficielles du sol, l'évaporation cumulée suit théoriquement une loi parabolique en fonction de ΣE_0 avec un coefficient de proportionnalité qui dépend de la nature du sol (PERRIER). La formation d'un tel « mulch » semble fréquente dans les conditions naturelles.

Les résultats expérimentaux de VERNET indiquent aussi que les petites pluies survenant pendant la deuxième phase sont rapidement évaporées sans que se modifie la variation parabolique de l'évaporation cumulée du stock d'eau initial. L'auteur parle à ce propos de « pluies suspendues ».

2. L'EXPÉRIMENTATION DE YANKOVITCH SUR CASES LYSIMÉTRIQUES

Pendant plus de 20 ans, cet auteur a suivi à Tunis un ensemble de cases lysimétriques de 2 m × 2 m × 2 m. L'une d'entre elles a été maintenue en sol nu pendant toute l'expérimentation. Ces cases ont été remplies couche

TABLEAU I
EXPÉRIMENTATION SUR CASES LYSIMÉTRIQUES
PLUIES MENSUELLES
(Après correction) (mm)

Année	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	Total
1	5	9	134	65	83	60	23	42	68	82	10	0	581
2	1	18	110	57	54	124	101	19	13	5	12	0	514
3	8	5	2	22	188	35	72	52	4	7	0	2	397
4	0	18	84	48	28	46	105	62	107	0	16	1	517
5	50	44	36	32	136	148	14	10	7	6	0	3	486
6	0	29	10	18	73	104	30	38	55	21	8	0	386
7	5	2	27	49	154	38	74	9	10	8	10	2	388
8	62	4	28	14	48	46	69	2	68	71	8	0	420
9	0	15	27	132	175	101	115	44	7	31	1	17	665
10	0	0	51	61	14	187	15	77	84	24	2	0	515
11	36	27	66	74	41	54	20	24	21	41	8	0	412
12	0	134	100	33	38	86	65	24	34	44	0	0	558
13	22	13	55	103	84	142	24	93	37	84	61	2	720
14	13	1	25	82	53	64	19	50	112	5	26	0	450
Moy.	14	23	54	56	84	88	53	39	45	31	12	2	501

par couche, avec beaucoup de soins, par la terre avoisinante, un sol argilo-calcaire assez lourd, retenant 36% environ de son poids sec à la rétention, et 15% au point de flétrissement permanent.

On dispose ainsi d'une longue série de mesures de drainage et en admettant que les conditions d'humidité du sol soient les mêmes au début et à la fin de la période de référence (ici du 1^{er} août au 31 juillet), de valeurs globales annuelles de l'évaporation du sol nu.

Les totaux mensuels de pluie et le nombre de jours de pluie par mois sont donnés par l'auteur de manière complète pendant les 14 dernières années de l'expérience. Ces cases reçoivent malheureusement en plus de la pluie, du ruissellement provenant des bords : l'auteur compense également à la suite de comparaisons entre le sol des cases et la terre en grande culture, l'effet brise-vent des parois... (Cette dernière compensation étant cependant très faible). La correction apportée ainsi à la pluie est de + 20%. Le tableau 1 fournit les données ainsi corrigées pour la pluie.

Cette correction étant faite, l'auteur donne l'évaporation du sol nu, mais elle correspond donc à une pluviosité supérieure à celle qui est enregistrée dans les conditions naturelles.

TABLEAU II
EXPÉRIMENTATION SUR CASES LYSIMÉTRIQUES
NOMBRE DE JOURS DE PLUIE

Année	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	Total
1	2	4	11	12	22	10	6	9	10	6	5	1	98
2	2	5	12	10	11	22	18	11	7	2	6	1	107
3	2	4	5	10	13	12	6	10	3	2	0	1	68
4	0	2	11	13	9	14	14	16	8	4	4	1	96
5	2	7	12	8	14	15	8	7	4	2	0	2	74
6	0	5	5	7	19	9	7	9	7	3	2	0	73
7	3	1	8	10	18	11	9	5	6	3	2	2	78
8	6	2	4	7	16	9	6	2	11	10	4	1	78
9	0	1	11	12	13	7	9	12	3	5	1	2	76
10	0	0	6	13	9	11	9	11	9	7	1	0	76
11	2	8	8	7	12	7	8	12	6	5	1	0	76
12	1	5	12	8	8	9	10	5	9	4	0	0	71
13	3	6	5	12	11	19	9	7	4	9	6	1	92
14	1	2	4	13	10	9	7	7	7	1	1	2	64

3. ÉVAPORATION ET PLUIES ANNUELLES

La méthode suivie ici consiste à proposer des modes de calcul pour l'évaporation en utilisant un petit nombre d'éléments usuels : hauteurs de pluie, répartition, évaporation potentielle et à les comparer aux données expérimentales, de manière à retenir la meilleure estimation.

La première démarche, et la plus simple, consiste à comparer l'évaporation annuelle et la pluie annuelle, ces valeurs sont indiquées dans le tableau ci-après.

L'étude de la régression entre les totaux annuels ΣE et P conduit à l'équation.

$$\Sigma E = 0,304 P + 194$$

— Coefficient de corrélation $r = 0,72$

— Erreur type d'estimation 29 mm (fig. 1).

On peut chercher à améliorer ce résultat en faisant intervenir le nombre de jours de pluie par an. Dans l'hypothèse où l'évaporation augmente à la fois avec la quantité annuelle de pluie et le nombre de jours de pluie nous avons introduit le coefficient $n P/365$ qui restituerait le total pluviométrique si tous les jours étaient pluvieux... La régression trouvée est :

$$\Sigma E = 0,84 \frac{n P}{365} + 252$$

$$r = 0,665$$

TABLEAU III

Année	Pluie	Drainage	Evaporation
1	581	188	393
2	514	210	304
3	397	114	283
4	517	133	384
5	486	167	319
6	386	44	342
7	388	107	281
8	420	41	379
9	665	270	395
10	515	178	337
11	412	66	346
12	558	211	347
13	720	297	423
14	450	134	316
Moy.	501	155	346

L'introduction de n n'a donc pas amélioré la relation pluie-évaporation.

Ces résultats sont insuffisants. De plus les pluies annuelles considérées sont supérieures aux valeurs réelles, mais la répartition des pluies est la même. Il serait donc dangereux d'extrapoler de telles relations.

On est donc amené à envisager une analyse plus fine de l'évaporation en faisant intervenir la répartition des pluies au cours de l'année.

3.1. HYPOTHÈSE N° 1 : $\Sigma E = a \Sigma n E_0 + A$

Nous essayons ici d'estimer la quantité d'eau perdue pendant la 1^{re} phase en admettant que c'est la fraction la plus importante de l'évaporation. Après chaque pluie, le sol est humide, l'évaporation est maximale, et ceci peut durer pendant un certain nombre de jours a . Il est en effet légitime d'envisager que c'est au moins le cas pendant le ressuyage du sol qui a une durée à peu près identique toute l'année (2 jours environ).

Pour évaluer l'évaporation potentielle E_0 , nous avons admis qu'elle était très proche de celle d'un gazon ras irrigué ; nous avons également considéré qu'elle était constante pour un mois donné, ce qui allège les calculs, sans introduire de fortes erreurs... E_0 est alors emprunté aux valeurs moyennes obtenues sur évapotranspiromètre (Kikuyu) pendant 14 années (1959-1972).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
E_0 mm/jour	1,5	2	2,6	3,6	5	6,2	6,7	6,3	4,4	3	2	1,5

Pour déterminer a , il faut d'abord éliminer les mois où l'évaporation est limitée par la quantité de pluie tombée, c'est-à-dire les mois où l'on a $n E_0 > P$ ou $\frac{P}{n} < E_0$; ceci revient implicitement à admettre que la pluie se répartit uniformément dans le mois entre les jours pluvieux, hypothèse simplificatrice que nous conserverons par la suite. Soit ΔP la quantité de pluie ainsi éliminée, il reste à comparer $\Sigma n E_0$ et $\Sigma E - \Delta P$, ce qui fournit une valeur approchée du coefficient a . Cette nouvelle valeur permet de modifier le critère d'élimination des mois à écarter qui devient $n E_0 > P$. Finalement, nous trouvons une valeur moyenne $\overline{\Delta P} = 31$ mm et la méthode des moindres carrés conduit à l'équation $\Sigma E - \Delta P = 1,185 \Sigma n E_0 + 129$.

— $r = 0,88$

— Erreur type d'estimation 25 mm.

La comparaison des valeurs calculées $\Sigma E c = 1,185 \Sigma n E_0 + 129 + \Delta P$ et mesurées ΣE est représentée dans la figure 2.

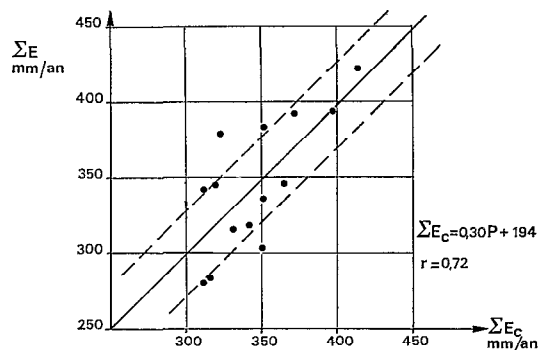


Fig. 1. — Evaporation annuelle calculée à partir de la pluie et évaporation déterminée sur case lysimétrique ΣE

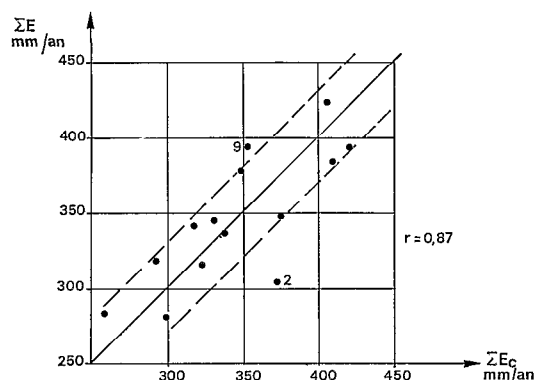


Fig. 3. — Evaporation annuelle calculée par $\Sigma E_c = \Sigma 4,9 n + 51 + \Delta P$ et évaporation déterminée sur case lysimétrique ΣE

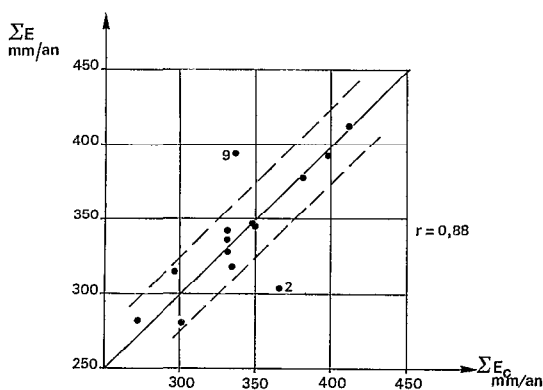


Fig. 2. — Evaporation annuelle calculée par $\Sigma E_c = 1,185 \Sigma n E_o + 129 + \Delta P$ et évaporation déterminée sur case lysimétrique ΣE

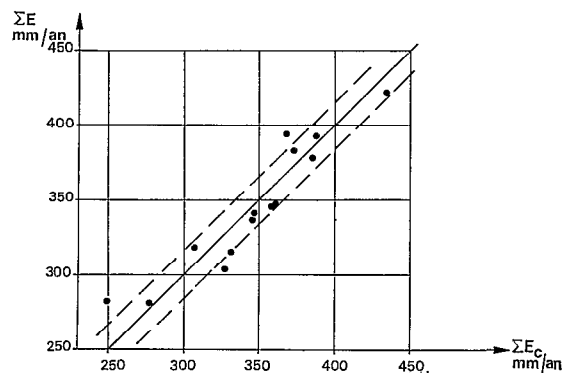


Fig. 4. — Evaporation annuelle calculée par $\Sigma E_c = 1,48 \Sigma n \sqrt{30 E_o/n} + \Delta P$ et évaporation déterminée sur case lysimétrique ΣE

Ce procédé est plus précis que la relation précédente. ($P, \Sigma E$), seules deux années présentent un écart dans l'estimation supérieur à 10%, ce sont les années 2 et 9, mais ces écarts sont importants + 20% et - 15%. D'autre part, le terme moyen en $n E_o$ n'est ici que de 186 mm ce qui entraîne une constante du même ordre (129 mm) et limite la précision du procédé.

3.2. HYPOTHÈSE N° 2 : $\Sigma E = k \Sigma n + B$

Dans cette hypothèse, nous admettons que chaque jour de pluie est suivi d'une évaporation k , constante toute l'année, représentant la perte d'eau pendant la 1^{re} phase, supposée être la fraction importante de l'évaporation.

Comme précédemment, il faut éliminer au préalable les mois pour lesquels l'évaporation est limitée par la pluie ; s'ajoutent ici les mois pour lesquels la perte d'eau est limitée par l'évaporation potentielle ΣE_o . Pour déterminer k , il faut donc procéder par approximations successives.

- 1) k est supposé égal à 6 mm, ce qui élimine les mois de début et fin de campagne où $n E_o$ est en général nettement supérieur à P , ainsi que les mois où ΣE_o est inférieur à 6 n.
- 2) Avec les mois qui restent, on peut établir une équation de régression pour les totaux annuels, portant sur les mois retenus.

3) La nouvelle valeur de k (ici 4,7) permet de prendre en compte des mois qui avaient été éliminés au départ. L'équation finale est :

$$\begin{aligned}\Sigma E - \Delta P &= 4,9 \Sigma n + 51 \\ - r &= 0,87 \\ - \text{Erreur type d'estimation} &= 30 \text{ mm}\end{aligned}$$

$\overline{\Delta P}$ est ici de 159 mm. La comparaison entre les valeurs annuelles calculées de l'évaporation $\Sigma E_c = 4,9 \Sigma n + 51 + \Delta P$, et les valeurs mesurées, est indiquée sur la figure 3. Les années 2 et 9 présentent comme dans l'estimation précédente les écarts les plus grands (+ 23% — 11%). Les autres écarts sont inférieurs à 10%. La précision obtenue ici est donc du même ordre que dans la méthode précédente.

3.3. HYPOTHÈSE N° 3 : $\Sigma E = \Sigma b \sqrt{\Sigma E_o}$

Ici, nous admettons également que la pluie se répartit uniformément pendant un mois donné : chaque pluie à l'intérieur d'un mois étant estimée à P/n ; l'écart de temps entre deux pluies est donc $30/n$.

L'hypothèse retenue consiste à considérer chacun de ces épisodes évaporatoires comme obéissant à une loi parabolique du type $\Sigma E = b \sqrt{\Sigma E_o}$, c'est-à-dire à admettre que la deuxième phase de l'évaporation est commencée.

Plusieurs cas peuvent alors se présenter.

1) $P < n E_o$ ou $P/n < E_o$.

Ces « petites » pluies sont considérées comme évaporées directement sans modifier la loi parabolique d'épuisement du stock d'eau du sol.

2) Si plusieurs mois consécutifs présentent cette particularité (c'est souvent le cas des mois d'été), ΣE_o représente l'évaporation potentielle cumulée de ces mois.

3) Pour un mois où l'on a $P/n > E_o$, il y a n épisodes évaporatoires de durée $30/n$; l'évaporation totale du mois est alors

$$bn \sqrt{30 E_o/n} \quad \text{ou} \quad b \sqrt{30 n E_o} \quad \text{ou} \quad b \sqrt{n} \sqrt{\Sigma E_o \text{ mois.}}$$

On peut objecter a priori que lorsque $30/n$ est petit, seule la 1^{re} phase de l'évaporation doit être envisagée : en fait, ceci arrive surtout en hiver où n est grand, mais où l'évaporation est limitée ; on verra par la suite que la méthode adoptée conduit à l'évaporation potentielle en décembre et janvier dès que n atteint 20 jours par mois. Enfin, l'hypothèse d'une répartition régulière de la pluie mensuelle tend à surestimer l'évaporation ce qui répond en partie à l'objection.

Pour déterminer b (coefficient dépendant de la nature du sol), il suffit de comparer les totaux annuels $\Sigma n \sqrt{30 E_o/n}$ et les valeurs annuelles de l'évaporation obtenue expérimentalement, après élimination des petites pluies « directement » évaporées (soit ici celles des mois où l'on a $P/n > E_o$).

Les résultats sont indiqués dans le tableau IV.

TABLEAU IV

N°	ΔP	$\Sigma E - \Delta P$	$\Sigma \sqrt{30 n E_o}$	Rapport b
1	24	369	245	1,51
2	68	236	175	1,35
3	51	232	133	1,74
4	35	349	228	1,53
5	26	293	190	1,54
6	18	314	222	1,41
7	46	235	156	1,51
8	28	351	241	1,46
9	35	360	224	1,61
10	26	311	216	1,44
11	29	317	222	1,43
12	0	347	243	1,43
13	15	408	279	1,46
14	6	310	220	1,41
Moy.	29	316	214	

Soit $\bar{b} = 1,48$

Avec $b = 1,48$ les évaporations calculées et mesurées sont les suivantes :

TABLEAU V
(figure 4)

N°	Calcul	Cases lysimétriques
1	387	393
2	327	304
3	248	283
4	372	384
5	307	319
6	346	342
7	277	281
8	385	379
9	367	395
10	345	337
11	358	346
12	359	347
13	434	423
14	331	316
Moy.	346	346

Erreur type d'estimation 16 mm

Les résultats sont nettement meilleurs que précédemment, seul l'écart enregistré pendant l'année n° 3 est supérieur à 10% (12,4%). Cette méthode permet d'autre part de calculer l'évaporation mensuelle ce qui va permettre de contrôler la validité de la formule adoptée pour des intervalles de temps plus courts que l'année.

4. DÉFICIT ESTIVAL, CALCUL DIRECT DU DRAINAGE

YANKOVITCH a en effet effectué des profils hydriques à la fin de l'été et estimé le déficit hydrique moyen de la case lysimétrique à cette période à 50 mm environ. Il est possible ici en comparant ΣE_c et ΣP pendant la saison chaude, d'évaluer ce même déficit. Il est également possible, dès que la pluie l'emporte sur l'évaporation calculée à l'échelle du mois, d'évaluer la quantité d'eau qui va percoler, une fois admis que le déficit doit d'abord être comblé. On peut donc juger, au moins à l'échelle de la saison, de la validité de la formule utilisée. Les résultats sont indiqués ci-après (tableau VI).

La comparaison des résultats reste satisfaisante. Le déficit d'été est proche de la valeur mesurée ; les percolations calculées montrent trois écarts supérieurs à 30 mm, les années 3, 9 et 10 mais 9 années montrent un écart inférieur à 20 mm.

On peut donc sans aucun doute considérer que la troisième hypothèse permet la meilleure estimation, sans qu'on puisse d'ailleurs tirer des conclusions sur la signification physique du résultat, étant donnée la méthode suivie ; on peut même s'étonner des bons résultats obtenus, après les simplifications effectuées. C'est donc cette dernière méthode qui sera utilisée par la suite, en particulier pour évaluer sur une période de 10 ans à Tunis ce qu'on peut attendre du stockage de l'eau par un sol maintenu sans végétation.

TABLEAU VI

N°	Saison chaude $\Sigma Ec - \Sigma P$ Déficit calculé (mm)	Saison pluvieuse $\Sigma P - \Sigma Ec$ (mm)	Percolation calculée (mm)	Percolation mesurée (mm)
1	40	236	196	188
2	39	236	197	210
3	62	211	149	114
4	47	189	142	133
5	34	221	187	167
6	79	119	40	44
7	60	173	113	107
8	39	69	30	41
9	68	391	323	270
10	86	228	142	178
11	32	108	76	66
12	60	245	185	211
13	68	336	268	297
14	56	174	118	134
Moy.	55	210	155	154

5. ÉVAPORATION D'UN SOL NU A TUNIS DE 1961 A 1971

Nous supposons évidemment qu'il s'agit d'un sol identique à celui de la case lysimétrique. La distribution des pluies a été empruntée à la station de Tunis-Manoubia du 1^{er} août 1961 au 31 juillet 1971. Pendant cette période la moyenne interannuelle de la pluviosité a été de 452 mm, ce qui est proche de la moyenne interannuelle obtenue sur les 93 années observées : 443 mm. Il y a eu cependant une année relativement exceptionnelle, l'année 1968-1969 qui, avec 278 mm, a une période de retour estimée entre 18 et 20 ans, suivant la loi de distribution adoptée.

Les résultats sont indiqués ci-dessous

TABLEAU VII

N°	Année	ΣP	ΣEc	$S = \Sigma P - \Sigma Ec$
1	(1961-1962)	428	366	62
2	(1962-1963)	548	438	110
3	(1963-1964)	542	380	162
4	(1964-1965)	508	336	172
5	(1965-1966)	359	401	-42
6	(1966-1967)	373	338	35
7	(1967-1968)	433	410	23
8	(1968-1969)	278	317	-39
9	(1969-1970)	569	423	146
10	(1970-1971)	485	363	122
Moy.		452	377	75

Deux années sont donc déficitaires et deux autres n'ont mis en réserve qu'une faible quantité d'eau.

La médiane du stock est comprise entre 62 et 110 mm. On peut donc estimer à 80 mm environ, le stock moyen d'eau gagné par la jachère travaillée. On voit cependant que 4 années sur 10 n'ont pas amené de gain très probant,

ce qui peut rendre contestable dans ces conditions l'intérêt d'une telle technique de culture pour améliorer l'économie de l'eau. On note également l'importance de la répartition des pluies mise en évidence quand on compare les années 1 et 7, 2, 3 et 10, 4 et 9.

On constate aussi que l'évaporation moyenne annuelle est plus élevée que pendant les 14 années de mesure sur case lysimétrique, bien que l'apport d'eau y soit plus faible... Ceci est dû au fait que la correction apportée aux pluies dans le processus expérimental favorise surtout les fortes pluies d'hiver, période pendant laquelle l'évaporation est limitée.

Les valeurs mensuelles de l'évaporation calculée sont indiquées ci-dessous, sans qu'il y ait lieu de leur attacher une grande importance, les totaux saisonniers étant plus significatifs.

Mois	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J
Ec mm/mois	13	35	37	27	36	35	39	44	41	30	24	16
P mm/mois	7	31	81	32	57	65	63	42	32	21	16	5
P-Ec mm/mois	-6	-4	44	5	21	30	24	-2	-9	-9	-8	-11
Totaux mm	- 49		+ 49			+ 75						

On note à la fin du mois de septembre un déficit moyen de 49 mm, chiffre qui rejoint exactement la valeur expérimentale déterminée par YANKOVITCH. Sur ce tableau, le déficit est comblé au début du mois de décembre, et la mise en réserve de l'eau se poursuit jusqu'au début du mois de mars. La variabilité de la quantité d'eau mise en réserve est cependant telle que ces estimations doivent être accueillies avec prudence.

6. ÉVAPORATION DU SOL NU DANS LA RÉGION DE SFAX

On peut étendre ces estimations à d'autres régions, en supposant qu'il s'agit encore du même type de sol c'est-à-dire en conservant $b = 1,48$; la station choisie pour cela a été Sfax.

Eo a été déterminé à partir de la formule de Penman ; cette dernière a pu être vérifiée à Tunis et à Gabès, où l'on dispose de longues séries de mesures sur évapotranspiromètre. Les valeurs retenues pour Sfax sont les suivantes : (d'après l'auteur).

Mois	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J
Eo mm/jour	6,2	4,6	3,6	2,7	2,0	1,9	2,5	3,5	4,1	5,4	6,1	6,6

Ces valeurs sont d'ailleurs proches de celles de Tunis (moins de 10% d'écart au total).

L'estimation de l'évaporation a porté sur 5 années d'août 1970 à juillet 1975. On trouve finalement une évaporation moyenne annuelle de 257 mm pour une pluie moyenne annuelle de 260 mm. On peut donc estimer qu'un sol comme celui qui est envisagé ne stocke pratiquement pas d'eau à Sfax. Les grandes plantations d'oliviers se trouvent d'ailleurs sur des zones de sols sableux, pour lesquels il convient de modifier le coefficient b de la formule utilisée.

Pour cela, on ne dispose guère que d'une comparaison faite par VERNET en 1961-1962, entre deux cases lysimétriques, l'une remplie d'un sol proche de celui utilisé par YANKOVITCH, l'autre d'un sol sableux. La percolation des cases entre décembre 1961 et mai 1962 a donné 45 mm pour la 1^{re} et 90 mm pour le sable. Le calcul donne 44 mm pour la case n° 1, ce qui est évidemment très satisfaisant ; l'ajustement à la case n° 2 conduit à $b = 1$, soit à l'expression $E = \sqrt{\Sigma} Eo$. Sur cette base (bien insuffisante !) on peut estimer l'évaporation moyenne annuelle d'un sol nu sableux à Sfax soit 193 mm, pour une pluie moyenne annuelle de 260 mm, le stock d'eau mis en réserve étant donc en moyenne de 67 mm.

Ainsi ces résultats apportent un argument supplémentaire aux agronomes qui affirment qu'avec des pluies

faibles seuls les sols sableux restent cultivables, grâce à l'effet protecteur du mulch. beaucoup plus efficace sur sable que sur les terres plus lourdes.

Si l'on admet qu'une plantation d'oliviers soit capable d'utiliser l'eau ainsi stockée, on peut évaluer les consommations d'eau des arbres pour des pluviosités différentes ; cette consommation d'eau peut être rapportée à la surface couverte par les arbres car on dispose alors d'une grandeur comparable à l'évapotranspiration classiquement définie par rapport à l'unité de surface du couvert. Soit s la surface couverte (en fraction d'hectare), recevant la pluie P , la surface de sol nu $1 - s$ permet la conservation d'un volume d'eau $S(1 - s)$, S étant la mise en réserve. La consommation d'eau par unité de surface couverte est alors :

$$[Ps + S(1 - s)] / s \text{ soit } P + S \frac{1 - s}{s}$$

A Tunis, on a $\bar{P} = 450$ mm, $\bar{S} = 80$ mm et des oliviers plantés à 12×12 m, d'une surface moyenne par arbre de 33 m^2 .

Avec 260 mm de pluie en moyenne, les plantations sont faites à 20×20 m, et les oliviers différents de ceux du nord ont une surface moyenne estimée à 50 m^2 ; soit ici un stock d'eau de 70 mm.

Les consommations d'eau sont alors :

P (mm)	S (mm)	$\frac{1-s}{s}$	$S \frac{1-s}{s}$	Total (mm)
450	80	3,35	268	718
260	70	7	490	750

Ces valeurs sont finalement très voisines. Il n'est pas certain évidemment que toute l'eau mise en réserve soit utilisable par les arbres, et il est vraisemblable que l'exploration du sol par les racines, près de la surface, modifie l'évaporation directe du sol nu (ces deux faits pouvant d'ailleurs se compenser en partie) ; il convient donc de considérer ces chiffres avec prudence. Cependant ils indiquent deux faits importants :

- 1) Les possibilités d'améliorer par la faible densité de plantation sur sol sableux en zone de faible pluviosité l'alimentation en eau des arbres qui peut rester comparable à celle qui existe plus au nord.
- 2) La part importante que représente alors dans l'alimentation en eau des plantations la mise en réserve sous sol nu ; ce stock dépend de la pluie, mais aussi de la répartition des pluies ; cette constatation peut expliquer pourquoi la seule hauteur de pluie annuelle se révèle souvent un paramètre insuffisamment représentatif de l'alimentation hydrique dans les zones climatiques peu arrosées.

7. CONCLUSION

Après avoir emprunté aux travaux fondamentaux des hypothèses de travail et les avoir confrontées aux données expérimentales de YANKOVITCH sur case lysimétrique, en n'utilisant que des variables faciles à obtenir : pluie mensuelle, nombre de jours de pluie par mois, évaporation potentielle, nous avons retenu l'estimation de l'évaporation annuelle du sol nu qui s'est avérée la meilleure. Dans ce calcul, l'évaporation cumulée ΣE_c pendant le temps t est obtenue par l'expression $\Sigma E_c = b \sqrt{\Sigma E_0}$ où ΣE_0 est l'évaporation potentielle cumulée pendant le même temps t .

Pour un mois de pluie P ayant n jours de pluie et quand $P/n > E_0$, cette expression devient :

$$\Sigma E_c = bn \sqrt{30 E_0/n}$$

On a donc supposé une distribution régulière de la pluie dans le mois. Malgré cette simplification, les résultats peuvent être considérés comme satisfaisants. Deux contrôles ont permis de vérifier que les estimations des évaporations saisonnières étaient également correctes : Déficit hydrique à la fin de l'été, évaluation de la quantité d'eau percolée pendant la saison pluvieuse.

On peut donc espérer disposer d'une méthode simple d'évaluation de l'évaporation d'un sol nu, tout au moins

à l'échelle de l'année, une fois connu b . Les valeurs adoptées ici se rapportent à deux types de sols très différents, un sol lourd argilo-calcaire et un sol sableux pour lesquels on a adopté les coefficients $b = 1,48$ et $b = 1$, valeurs qui doivent encadrer les coefficients de la plupart des sols.

Appliquée à la région de Tunis, cette méthode a permis d'évaluer un stockage moyen de l'eau sous sol nu de l'ordre de 80 mm ; la variabilité du stock d'eau est cependant telle qu'elle enlève beaucoup de signification à cette moyenne. Sous la pluviosité sfaxienne, un sol identique ne stockerait pas d'eau, mais les sols sableux qui sont plantés peuvent retenir une réserve non négligeable (67 mm, pour 260 mm de pluie).

Une évaluation simple montre alors que les consommations d'eau des oliviers dans le sud de la Tunisie peuvent être du même ordre que dans les zones mieux arrosées. On retrouve là une donnée écologique soulignée par A. VERNET qui note qu'au voisinage des déserts, seuls les sables restent cultivables dans les conditions naturelles.

Il faut noter enfin que l'évaluation de l'évaporation du sol nu proposée ici se prêterait aisément à l'étude du bilan d'eau des zones dénudées d'un bassin versant, étude pour laquelle, en dehors de la mesure directe de l'humidité du sol, on dispose en général de peu de moyens.

BIBLIOGRAPHIE

- COVEY (W.) – 1963 – « Mathematical study of the first stage of drying of a moist soil ». *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27.
Direction des ressources en eau – *Dossier pluviométrique de Tunis-Manoubia*.
- FEODOROFF (A.) et RAFI (M.) – 1962 – « Évapotranspiration de l'eau à partir d'un sol nu ». *C. R. Acad. Sci.* 225.
- GARDNER (W. R.) – 1959 – « Solutions of the flow equation for the drying of soils and other porous media ». *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.* 23.
- GARDNER (W. R.) et HILLEL (D. I.) – 1962 – « The relation of external evaporative conditions to the drying of soils ». *Geophys Res.* 67.
- Institut national de la météorologie de la République tunisienne – *Bulletins météorologiques annuels 1970-1975*.
- Institut national de la recherche agronomique de Tunisie – *Données climatologiques*.
- MILLER (E. E.) et KLUTE (A.) – 1967 – « The Dynamics of soil water Irrigation of agricultural lands ». *American society of Agronomy*, vol. 11 p. 209.
- PERRIER (A.) – 1973 – « Bilan hydrique de l'assolement blé jachère et évaporation d'un sol nu en région semi-aride ». *Actes Col. Uppsala* ; UNESCO.
- VERNET (A.) – 1963 – *Evaporation de l'eau du sol in L'eau et la production végétale*. INRA.
- YANKOVITCH (L.) – 1956 – « Résultats de 22 années d'expériences dans les cases de végétation du service botanique et agronomique de Tunisie ». *Annales du serv. Bot. et Agron. de Tunisie*, vol. 29.

Je remercie également R. COMBREMONT de la FAO pour les renseignements concernant les plantations d'oliviers en Tunisie.