

25 SEP. 1990

N° : 30.740 ex 1

Cote : B p182

Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques *in situ* sous culture de maïs

J.P. FRETEAUD (1), R. POSS (2), H. SARAGONI (3)

RÉSUMÉ — Les différents termes du bilan hydrique ont été étudiés par la méthode tensio-neutronique pendant trois saisons sous une culture de maïs. Afin de permettre une extrapolation dans le temps et dans l'espace des résultats obtenus, le bilan hydrique a été simulé à l'aide d'un modèle empirique sur l'ensemble de la période d'expérimentation. Dans le but d'améliorer la concordance entre les valeurs observées et les valeurs simulées d'évapotranspiration et de drainage, le modèle a été modifié : il prend en compte l'évaporation du sol nu en début de cycle et l'effet de la dynamique racinaire. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des analyses statistiques sur les termes du bilan hydrique et à une étude régionale des contraintes pédo-climatiques liées à la culture du maïs.

Mots clés : *Zea mays*, maïs, bilan hydrique, modélisation, évapotranspiration, drainage, réserve en eau utile, Togo.

L'évaluation de la consommation en eau d'une culture à l'échelle de la parcelle est maintenant bien maîtrisée grâce à l'utilisation de lysimètres ou des techniques tensio-neutroniques. Il a été établi pour un certain nombre de cultures, dont le maïs (DENMAED et SHAW, 1960 ; THEVENET et COUVREUR, 1978 ; ROBELIN, 1984 ; DECKERS *et al.*, 1985 ; etc.), que la quantité de matière sèche, et même parfois le rendement en grains, sont fortement corrélés à l'évapotranspiration du couvert végétal.

Il est donc particulièrement intéressant d'utiliser des modèles de simulation du bilan hydrique pour parvenir à une extrapolation dans le temps de résultats obtenus sur quelques années, et dans l'espace de résultats obtenus ponctuellement. De nombreux modèles déterministes ont été élaborés depuis longtemps (RITCHIE, 1972 ; KEULEN, 1975 ; BELMANS *et al.*, 1983 ; SIMOTA *et al.*, 1986 ; etc.). Leur concordance avec les données de terrain est souvent excellente, mais leur utilisation nécessite l'évaluation de nombreux paramètres souvent difficiles à apprécier (coefficient de conductivité hydraulique du sol, densités racinaires...). Ceci rend leur emploi délicat pour les études régionales et pour la simulation sur de longues séries climatiques.

(1) IRAT, BP 596, Ouagadougou, Burkina Faso.

(2) ORSTOM, BP 375, Lomé, Togo.

(3) DRA, BP 1163, Lomé, Togo.

Le modèle présenté ici, développé par l'Institut de recherches agronomiques tropicales (IRAT) depuis 1977 (FRANQUIN et FOREST, 1977), est un modèle empirique. Ce type de modèle tend à se développer rapidement (REDDY, 1983 ; HENRICKSEN et DURKIN, 1985 ; PELLERIN, 1986...), en raison de la généralisation de la micro-informatique et du bon ajustement des résultats sur les mesures *in situ*. Dans le modèle utilisé, le sol est assimilé à un réservoir d'eau. Ce réservoir se remplit par effet piston, et les plantes y puisent d'autant plus difficilement que la quantité d'eau disponible est faible. Grâce à la prise en compte de paramètres facilement déterminables, il permet d'estimer les différents termes du bilan hydrique à une échelle régionale. Cette approche a déjà permis de proposer des indices standards de classification des situations pédo-climatiques (FOREST et KALMS, 1984 ; FOREST et REYNIERS, 1986).

Avant d'utiliser ce modèle de simulation dans les conditions pédo-climatiques du sud du Togo, nous l'avons comparé à des mesures réalisées *in situ*, ce qui nous a amenés à proposer et tester certaines modifications. Les valeurs obtenues à l'aide du modèle modifié seront comparées aux résultats des mesures tensio-neutroniques.

Le dispositif expérimental et les méthodes de mesure *in situ*

La station agronomique de Davié, près de Tsévié, est située dans le sud du Togo sur des sols ferrallitiques rouges, profonds et sans éléments grossiers appelés localement terres de barre. Cette région reçoit un total pluviométrique compris entre 800 et 1 000 mm. La présence d'une grande et d'une petite saison des pluies (figure 1) permet deux cycles de culture, avec un risque important d'échec pour le deuxième cycle, dont le total pluviométrique dépasse rarement 300 mm. À ce problème hydrique s'ajoutent d'importantes carences minérales résultant d'une exploitation continue du sol sans rotation ni restitution des résidus de récolte et d'une lixiviation des éléments minéraux.

Afin de mesurer l'évapotranspiration du maïs, principale culture de la région, et les pertes minérales par drainage, une étude de bilan hydrique a été réalisée

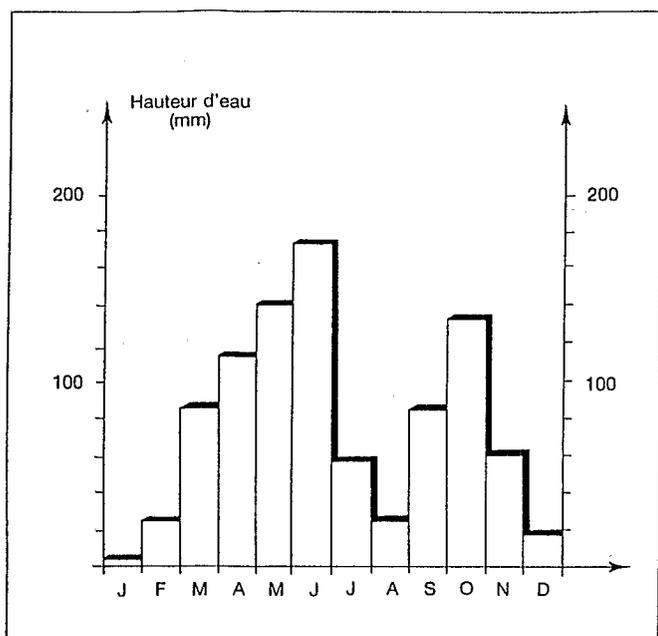


Figure 1 : Pluviométrie médiane mensuelle à Tsévié (1934-1985).

sur deux parcelles de 40 m² d'un essai factoriel de longue durée (8 années au début de l'expérimentation). Sur la première, les éléments minéraux sont apportés à la dose préconisée dans la région pour obtenir les rendements optimaux. La deuxième parcelle ne reçoit pas de potassium. Cette étude de l'effet du potassium est réalisée en raison de l'importance de cet élément en tant que facteur d'élaboration du rendement dans les conditions locales : en l'absence d'apport de potassium, le rendement diminue de plus de 50 %.

La variation du stock d'eau dans le sol a été suivie à l'aide de mesures à l'humidimètre à neutrons (Solo 25, Nardeux) réalisées au moins deux fois par semaine sur les quatre tubes de chaque parcelle implantés à deux mètres de profondeur. Le drainage a été évalué quotidiennement à l'aide de la loi de Darcy généralisée (RICHARDS, 1931) :

$$q = -K(h) \frac{dH}{dz} \quad (1)$$

q : flux hydrique à la profondeur étudiée ;
 K : coefficient de conductivité hydraulique ;
 h : succion matricielle ;
 H : charge hydraulique ;
 z : profondeur.

Les charges hydrauliques ont été mesurées à l'aide d'une batterie de 14 tensiomètres par parcelle, implantés entre 5 et 195 cm. Les coefficients de conductivité ont été calculés selon la méthode du bilan naturel (VACHAUD *et al.*, 1978), à partir des charges hydrauliques relevées sur chaque parcelle. Les parcelles étant tôlees sur leur pourtour pour éviter tout ruissellement, l'évapotranspiration (ETR) du couvert et l'évaporation du sol nu (ESN) en début de cycle ont pu être déterminées à l'aide de l'équation simplifiée de conservation de la masse :

$$ETR = P \pm D - \Delta \text{ stock} \quad (2)$$

ETR : évapotranspiration du couvert (évaporation du sol nu ESN en début de cycle) ;

P : pluviométrie ;

D : drainage ;

Δ stock : variation du stock.

Par ailleurs, le développement du maïs a été suivi par des mesures effectuées tous les 15 jours afin de définir les courbes de croissance des parties aériennes et du système racinaire (figure 2).

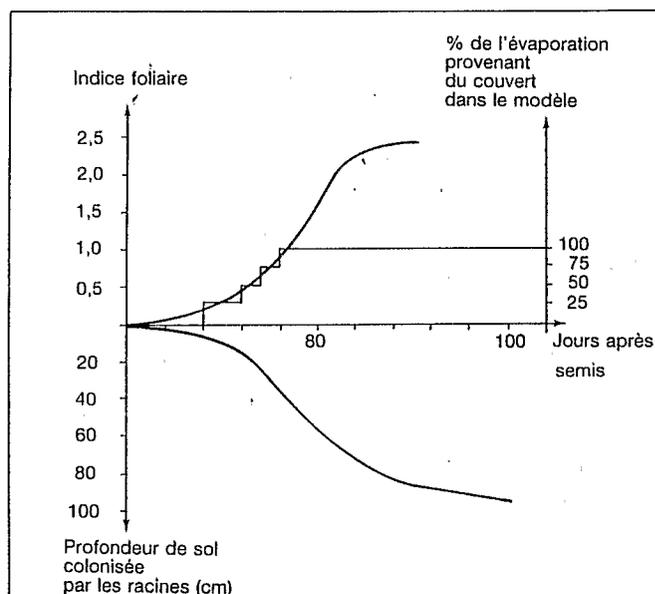


Figure 2 : Évolution de l'indice foliaire et de la pénétration racinaire au cours du cycle du maïs NHI F1 et modélisation de l'évaporation (Davié, parcelle fertilisée).

Le modèle de simulation du bilan hydrique BIP 4

Présentation générale

Le modèle BIP 4 (FOREST, 1984) a été conçu pour évaluer les termes du bilan hydrique de l'équation (2) à une échelle de temps pentadaire ou décadaire. Ce modèle empirique simule le fonctionnement d'un réservoir à effet piston, en utilisant l'équation (2). Les flux entrant et sortant sont la pluie, d'une part, l'évapotranspiration et le drainage, d'autre part.

Principe de fonctionnement du sol en tant que réservoir d'eau

Pour une profondeur donnée, le volume du réservoir d'eau du sol est assimilé à la réserve utile (RU) définie par :

$$RU = S_1 - S_2 \quad (3)$$

S₁ : stock d'eau à la capacité de rétention ;

S₂ : stock d'eau au point de flétrissement.

Au début de la simulation, le réservoir est vide, ce qui correspond bien aux conditions tropicales sèches, où la saison de culture débute après une longue saison sèche. Sous l'effet des pluies, ce réservoir se remplit progressivement par effet piston, ce qui se traduit par un front d'humectation à la base : à chaque pas de temps, si la somme des apports pluviométriques et du stock d'eau préexistant dépasse la capacité de stockage de la tranche de sol comprise entre la surface et le front, celui-ci progresse afin d'absorber cet excédent. À ce moment-là, le réservoir est saturé de la surface jusqu'au front d'humectation. Lorsque le front d'humectation parvient à la base du profil (définie par la réserve utile totale du sol, RU), le drainage commence : c'est la différence entre l'offre totale en eau (pluie plus stock préexistant) et la réserve utile du sol.

Estimation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est liée à la demande climatique, aux caractéristiques de la culture et à la quantité d'eau disponible dans le sol.

En toute rigueur, la demande climatique est caractérisée par l'évapotranspiration potentielle, ETP selon Penman. Cependant, DANCETTE (1976) a montré, au Sénégal, que l'évaporation du bac de classe A est étroitement corrélée à l'évapotranspiration potentielle au cours de la saison des pluies. De ce fait, les études de besoin en eau ETM des cultures font le plus souvent référence à l'évaporation du bac de classe A (DANCETTE, 1983), dont la mesure est largement répandue en Afrique sud-saharienne :

$$ETM = K'c \cdot EVA \quad (4)$$

ETM : évapotranspiration maximale de la culture ;
K'c : coefficient cultural de la culture à un stade donné ;
EVA : évaporation du bac de classe A.

EAGLEMAN (1971) a proposé, à partir de différentes expérimentations sur les besoins en eau, une relation empirique entre l'évapotranspiration réelle, les besoins en eau d'une culture et l'humidité relative du sol :

$$ETR/ETM = A + B \cdot HR + C \cdot HR^2 + D \cdot HR^3 \quad (5)$$

HR : stock d'eau disponible/RU ;
RU : capacité de stockage de la tranche de sol comprise entre la surface et le front d'humectation ;
A, B, C et D : paramètres d'ajustement.

Cette relation, qui traduit la difficulté croissante pour la culture à satisfaire ses besoins en eau à mesure que le sol s'assèche, est la base de la simulation.

Sorties du modèle

Les résultats de la simulation sont fournis à l'échelle pentadaire (ou décadaire), du cycle et d'une série d'années. À l'échelle pentadaire, les principales sorties sont la pluviométrie, le ruissellement, le drainage, l'évapotranspiration réelle, le taux de satisfaction des

besoins en eau de la plante (ETR/ETM) et la profondeur atteinte par le front d'humectation. Un tableau récapitulatif fournit le taux de satisfaction des besoins en eau au cours des différentes phases végétatives et pour l'ensemble du cycle. Si la simulation est effectuée sur plusieurs années, les moyennes des différents paramètres sont calculées.

Améliorations apportées au modèle

Le modèle d'origine présentait deux limitations :

- la formulation d'EAGLEMAN ne prend pas en compte l'évaporation du sol en début de cycle ;
- au cours du cycle, la réserve en eau utile pour la culture est liée à la profondeur du front d'humectation. Or, le front d'avancée racinaire est généralement situé au-dessus de cette limite, ce qui, en l'absence de remontées capillaires, entraîne une surestimation de la réserve utile racinaire (RUR).

Pour une meilleure adaptation du modèle, nous avons donc pris en compte ces deux phénomènes.

Prise en compte de l'évaporation du sol nu

L'évaporation du sol nu a été suivie sur deux parcelles à six mois d'intervalle (figure 3), en mettant à profit l'intervalle de temps compris entre deux pluies importantes. Il apparaît que l'évaporation décroît d'une manière exponentielle au cours du temps. En première

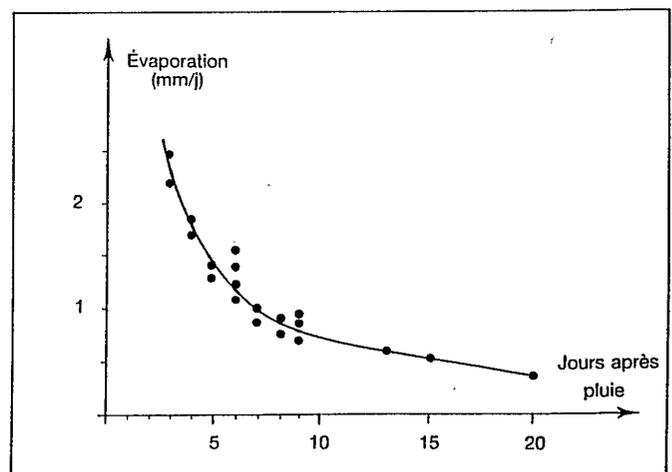


Figure 3 : Évapotranspiration du sol nu mesurée (moyenne de quatre tubes).

approximation, nous avons retenu pour la simulation les relations suivantes :

- les deux premiers jours après la pluie (où l'on ne dispose pas de mesures humidimétriques pour cette cinétique), l'évaporation est considérée égale à celle du bac de classe A si le total pluviométrique le permet ; ceci correspond à ce que nous avons pu mesurer lors du suivi d'autres cinétiques et aux résultats obtenus par différents auteurs (HIDE, 1954 ; LEMON, 1956) ;
- les jours suivants, l'évaporation est considérée égale à 1,5 mm par jour jusqu'à épuisement de la réserve. Nous avons préféré introduire cette valeur moyenne dans le modèle de simulation plutôt que l'équation d'une courbe, car cela permettra une adaptation facile à d'autres types de sols.

Le passage d'un régime d'évaporation du sol nu à un régime d'évapotranspiration du couvert est modélisé en s'appuyant sur les mesures d'indice foliaire (figure 2). Nous admettons que lorsque l'indice foliaire dépasse l'unité, l'évapotranspiration ne provient que du couvert. Auparavant, les parts respectives de l'évaporation du couvert et du sol évoluent parallèlement à l'indice foliaire :

- du 1^{er} jour après le semis au 20^e jour, $ETR = ESN$;
- du 21^e au 30^e jour, $ETR = 0,75 ESN + 0,25 ETR$ Eagleman ;
- du 31^e au 35^e jour, $ETR = 0,50 ESN + 0,50 ETR$ Eagleman ;
- du 36^e au 40^e jour, $ETR = 0,25 ESN + 0,75 ETR$ Eagleman ;
- après le 41^e jour, $ETR = ETR$ Eagleman.

Introduction d'une réserve utile racinaire (RUR)

La dynamique de l'enracinement a été suivie au cours de deux saisons de culture par ouverture de fosses tous les 15 jours et estimation visuelle. Deux paramètres ont été estimés. Le premier est la profondeur maximale atteinte par les racines, qui a indiqué la profondeur à laquelle le bilan devrait être déterminé (1,50 m). Le second est la tranche de sol contenant plus de 90 % des racines, ce paramètre déterminant la tranche de sol utilisable comme réservoir d'eau. Son évolution au cours du cycle cultural (figure 2) met en évidence trois phases successives (0-30 jours, 30-70 jours et 70-110 jours) qui correspondent à la levée, à la croissance et à la maturation (CHOPART, 1983).

La réserve utile a été évaluée par tranches de sol (tableau I), par différence entre les stocks d'eau à la capacité de rétention et à la tension de 1 500 HPa (point de flétrissement). Les humidités à la capacité de rétention ont été déterminées 24 heures après le début du ressuyage et correspondent au passage d'une cinétique rapide à une cinétique lente sur les courbes d'évolution de l'humidité (figure 4).

Les humidités au point de flétrissement sont les valeurs moyennes des mesures effectuées à la presse à membrane sur 13 échantillons prélevés indépendamment.

L'évolution au cours du cycle de la réserve utile disponible pour les racines, prenant en compte la dynamique racinaire et la réserve utile de chaque horizon, est représentée sur la figure 5. Sur chacune des trois phases décrites précédemment, des relations linéaires ont été ajustées et introduites dans le modèle afin de mieux traduire le stock d'eau réellement disponible pour les racines. C'est une valeur de la réserve utile racinaire (RUR) qui est alors prise en compte pour le calcul de l'humidité disponible (terme HR de l'équation (5)) dans le modèle modifié :

$$HR = \text{stock d'eau disponible} / RUR$$

RUR : capacité de stockage de la tranche de sol colonisée par les racines.

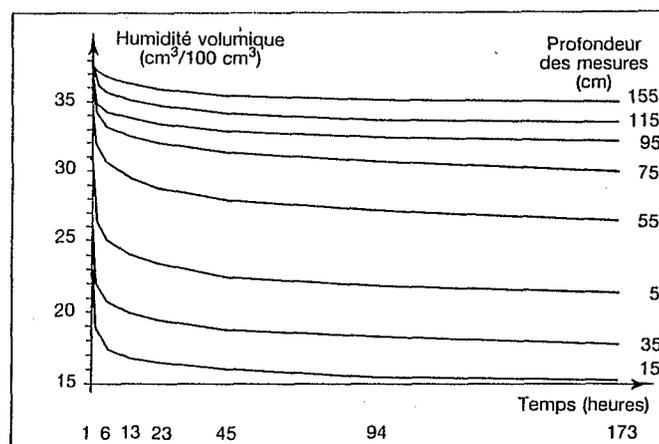


Figure 4 : Suivi du drainage interne par tranche de sol, après apport d'eau.

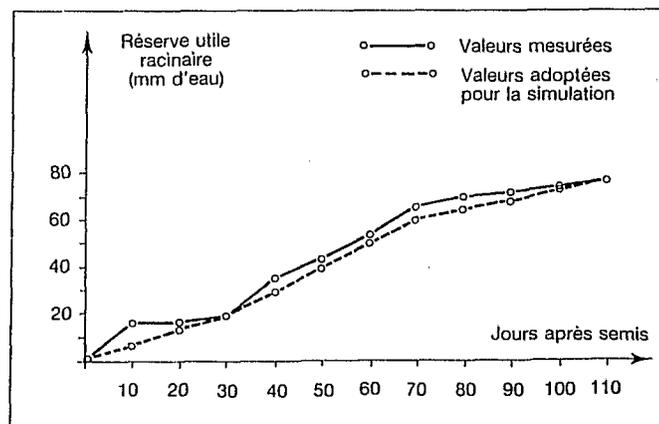


Figure 5 : Évolution de la réserve utile racinaire sous culture de maïs (NHI F1).

Tableau I Évaluation de la réserve utile par tranche de sol.

Profondeur (cm)	Humidité après 24 h (cm ³ /100 cm ³)	Humidité au pF 4,2 (cm ³ /100 cm ³)	Réserve utile	
			sur la tranche (mm)	cumulée (mm)
0-10	22,2	6,8	15,4	15,4
10-20	17,2	8,5	8,7	24,1
20-30	17,7	11,5	6,2	30,3
30-40	19,3	13,8	5,5	35,8
40-50	20,8	16,3	4,5	40,3
50-60	23,4	16,0	7,4	47,7
60-70	25,0	18,5	6,5	54,2
70-80	26,2	18,4	7,8	62,0
80-90	26,9	19,3	7,6	69,6
90-100	27,0	19,3	7,7	77,3
100-110	27,4	19,7	7,7	85,0
110-120	27,6	20,0	7,6	92,6
120-130	27,9	20,5	7,4	100,0
130-140	28,6	20,6	8,0	108,0
140-150	29,2	21,6	7,6	115,6

Analyse de la correspondance entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées

Données agroclimatiques utilisées pour la simulation

La simulation a été réalisée sur trois saisons de culture pour lesquelles nous disposons de mesures tensio-

néutroniques : première saison des pluies 1984, première et deuxième saisons 1985. Pour chaque saison de culture, les mesures agroclimatiques ont été réalisées à proximité des parcelles d'essai.

La pluviométrie (figure 6) a été régulière au cours de la première saison 1985, mais déficitaire fin mai et début juin en 1984. Lors de la deuxième saison des pluies de 1985, les précipitations se sont arrêtées le 17 novembre, soit plus d'un mois avant la fin du cycle cultural.

Les évaporations du bac de classe A (tableau II) ont

Tableau II Valeurs décadaires de l'évaporation du bac de classe A (en mm).

		Janvier		Février		Mars		Avril		Mai		Juin	
		1984	1985	1984	1985	1984	1985	1984	1985	1984	1985	1984	1985
Décade	1	44	38	75	50	71	58	51	45	53	53	40	43
	2	50	46	63	51	70	60	62	54	47	49	40	50
	3	53	52	61	49	60	58	44	52	53	41	45	39
Moyenne mensuelle		49	45	66	50	67	59	52	50	51	48	42	44
		Juillet		Août		Septembre		Octobre		Novembre		Décembre	
		1984	1985	1984	1985	1984	1985	1984	1985	1984	1985	1984	1985
Décade	1	42	36	44	33	49	38	40	38	48	40	41	39
	2	35	35	44	36	48	40	40	45	50	38	41	32
	3	45	38	51	40	40	46	39	37	42	38	31	36
Moyenne mensuelle		41	36	46	36	46	41	40	40	47	39	38	36

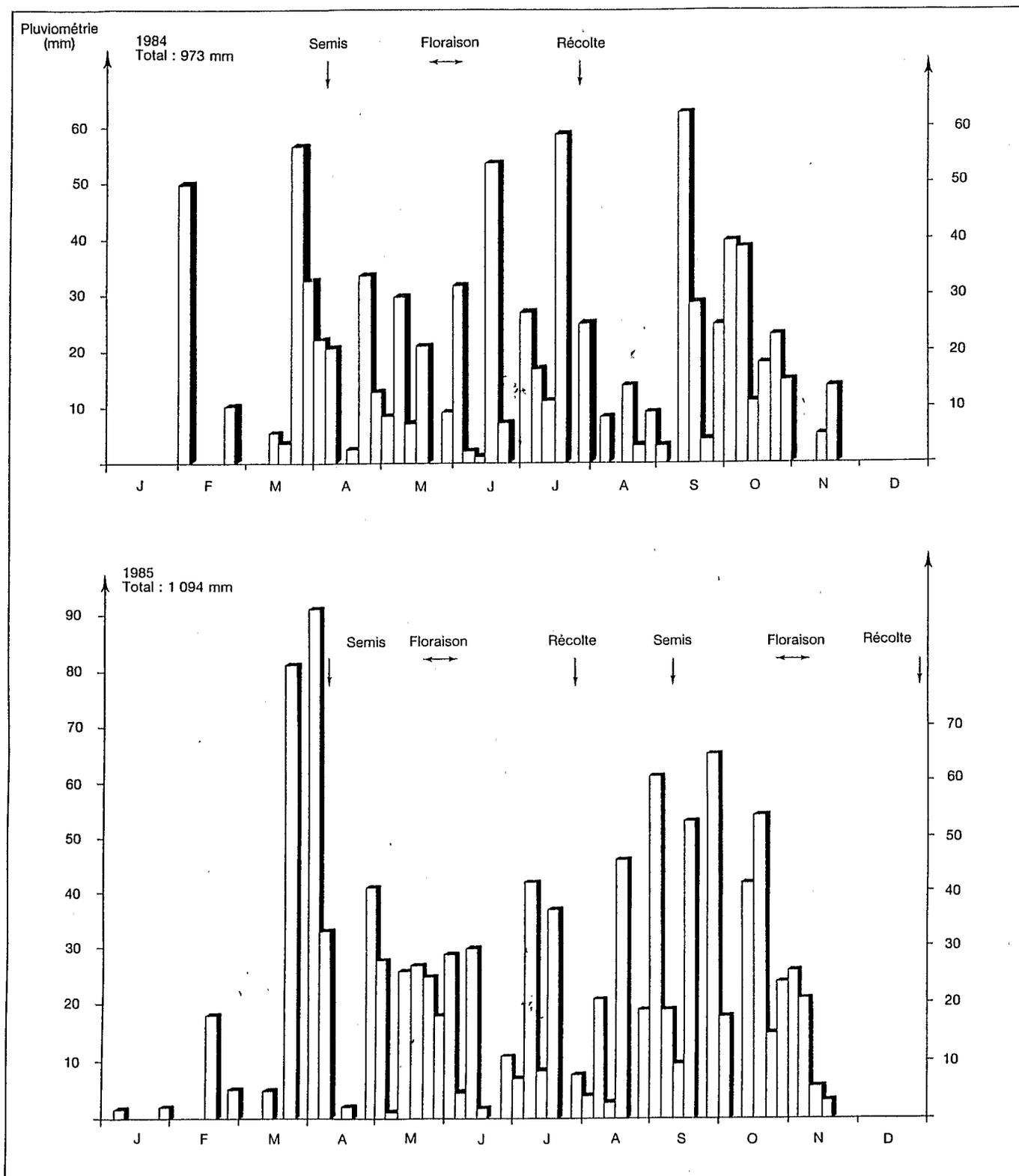


Figure 6 : Pluviométrie pentadaire à Davié (1984 et 1985) et calendrier cultural du maïs NH1 F1.

été mesurées à 10 km de la station (Ativémé) de janvier 1984 à mars 1985, puis sur le site d'expérimentation. Elles sont relativement faibles et peu variables (de 4 à 6 mm par jour) : le maximum se situe en période d'harmattan (février-mars) et le minimum entre la première et la seconde saison des pluies (juillet-août).

Les coefficients culturaux K_c ont été déterminés expérimentalement sur le site (tableau III). Pour la variété de maïs NH1 F1 de 110 jours, ils passent par un maximum marqué au moment de la floraison (évapotranspiration maximale supérieure à celle du bac entre le 45^e jour et le 60^e jour).

Tableau III Coefficients culturaux K'c (ETM = K'c · EVA) pentadaires du maïs NH1 F1 (cycle de 110 jours).

Stade physiologique	Levée					Montaison				Floraison			Maturation									
N° de pentade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Coefficient cultural	0,40	0,40	0,40	0,45	0,48	0,52	0,60	0,65	0,80	1,10	1,15	1,10	0,80	0,70	0,65	0,62	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

Évolution de l'évapotranspiration et du drainage au cours du cycle de culture du maïs

Les valeurs mesurées sur la parcelle fertilisée ont été comparées aux valeurs simulées à l'aide du modèle d'origine (BIP 4) et du modèle modifié (BIP Togo) pour les trois cycles de culture (figure 7). Seules les deux courbes « enveloppes » (valeurs maximales et minimales) des ETR mesurées sont représentées sur cette figure.

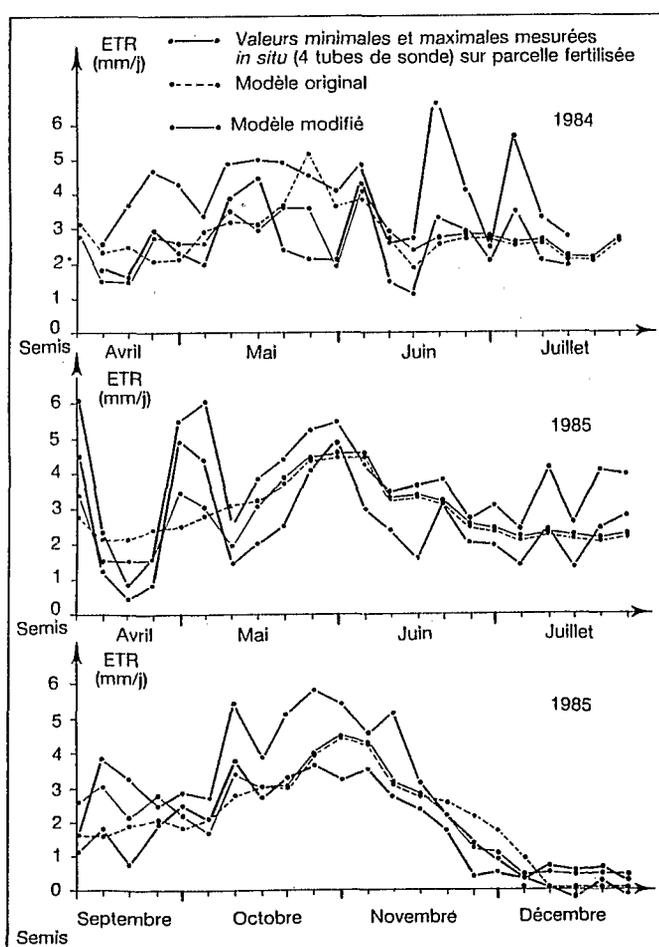


Figure 7 : Évolution au cours du cycle des évapotranspirations mesurées et simulées (maïs NH1 F1).

Les modifications apportées au modèle d'origine apparaissent clairement sur la figure. Elles permettent de mieux rendre compte de l'irrégularité de l'évaporation du sol nu mesurée en début de cycle. L'influence de l'introduction de la dynamique racinaire apparaît à la fin du mois de mai 1984, et en 1985 sur la période allant du 10 novembre au 20 décembre. En mai 1984, la diminution de l'évapotranspiration simulée par le modèle (BIP Togo) provient de la présence de réserves hydriques situées en dessous du front racinaire et considérées comme utilisables par le modèle BIP 4.

À la fin de la petite saison des pluies de 1985, on observe sur le graphique que les réserves hydriques du sol sont moins vite épuisées par la simulation avec le modèle modifié BIP Togo. Cela provient de ce que l'évapotranspiration, dans BIP Togo, est limitée par l'avancée du front racinaire : cette progression met à la disposition de la plante des réserves en eau nouvelles, mais faibles en quantité. Par contre, dans le cas du modèle BIP 4, la simulation autorise la plante à prospector l'ensemble du réservoir (dès que celui-ci est rempli), ce qui conduit à un épuisement plus rapide de ces réserves. Les observations et les mesures faites sur le terrain confirment donc le bien-fondé des modifications apportées.

Si l'on excepte les pics observés à l'humidimètre en 1984 à la fin du cycle cultural, probablement liés à des problèmes de mesures, le modèle BIP Togo rend bien compte des variations pentadaires d'évapotranspiration, en particulier des phases sèches observées au début du mois de juin 1984 et à la fin du cycle de la deuxième saison des pluies de 1985. La courbe simulée est généralement comprise entre les valeurs mesurées extrêmes. Il est difficile d'atteindre une meilleure précision du fait des erreurs tant expérimentales sur les mesures qui permettent de calculer l'évapotranspiration (HAVERKAMP *et al.*, 1984 ; VAUCLIN *et al.*, 1984) que sur la détermination des données d'entrée du modèle, en particulier les coefficients culturaux (DANCETTE, 1983).

En comparant les valeurs pentadaires mesurées et simulées du drainage (figure 8), on s'aperçoit que les phases de drainage importantes coïncident ; cependant, le drainage se poursuit longtemps après une pluie, ce qui n'apparaît pas à la simulation. Cette différence s'explique par la modélisation des transferts hydriques dans le sol (effet piston) qui ne peut pas rendre compte des transferts d'eau non saturante.

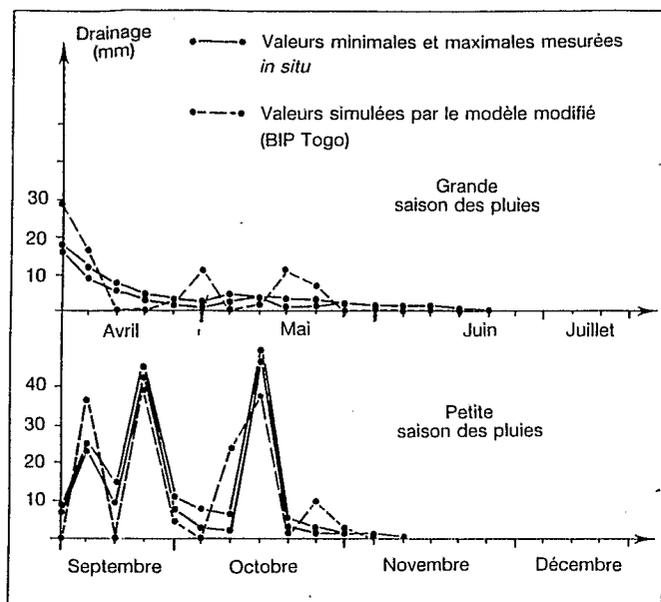


Figure 8 : Valeurs pentadières mesurées sur deux parcelles et simulées (modèle modifié) du drainage en 1985.

Évapotranspiration et drainage cumulés sur le cycle cultural

Si l'on compare les valeurs cumulées mesurées et simulées à l'aide du modèle BIP Togo de l'évapotranspiration et du drainage à 1,5 mètre de profondeur sur l'ensemble du cycle (tableau IV), il apparaît une différence toujours inférieure à 20 % sur l'évapotranspiration, quel que soit le niveau de fertilisation. Ceci permet d'envisager l'utilisation de ce modèle en conditions de culture paysanne traditionnelle. De plus, sans préjuger de la précision de l'une ou l'autre méthode, la bonne correspondance des résultats permet d'utiliser le modèle pour une extension spatiale des mesures locales.

Conclusion

Malgré le caractère empirique du modèle, les erreurs inhérentes à la méthode tensio-neutronique et les différences d'échelle de perception, une bonne correspondance entre les deux approches a été mise en évidence sur les terres de barre au cours de trois saisons de culture de maïs. L'introduction dans le modèle de l'évaporation du sol nu en début de cycle et de la dynamique de l'enracinement améliore l'ajustement. Si des différences apparaissent à des pas de temps courts, l'évolution de l'évapotranspiration est similaire et les cumuls de l'évapotranspiration et du drainage sur l'ensemble du cycle sont très proches. Pour affiner les résultats, soit en précision, soit sur un pas de temps plus court, il serait nécessaire de modéliser plus précisément le fonctionnement physiologique de la plante.

Dans l'état actuel, ce modèle permet d'étendre dans le temps les résultats obtenus sur quelques années de mesure en simulant des séries climatiques de longue durée. Il ouvre ainsi la voie à des analyses statistiques sur les termes du bilan hydrique débouchant sur des notions de risque et de potentiel.

Par ailleurs, la validation de ce modèle permet d'envisager son utilisation sur d'autres stations climatiques du sud du Togo, où les terres de barre sont largement répandues, afin d'analyser à l'échelle régionale les contraintes pédoclimatiques liées à la culture du maïs.

Reçu le 15 avril 1987.
Accepté le 16 juillet 1987.

Remerciements. Les auteurs sont très reconnaissants à J. IMBERNON de son aide, tant en ce qui concerne l'ajustement du modèle que la mise en forme du présent article.

Tableau IV Données sur l'ensemble du cycle (maïs NH1 F1).

Année campagne	Rendement (q/ha)		ETR sur le cycle (mm)			Drainage à 1,5 m (mm)			
	Sans potassium	Avec potassium	Sans potassium	Avec potassium	Simulée	Sans potassium	Avec potassium	Simulée	
1984 Première saison	14,1	21,4	(330)*	(345)*	292	0	0	8	
1985	Première saison	11,8	30,2	342	348	311	54	50	64
	Deuxième saison	7,6	18,0	216	252	246	176	153	154

* Mesures débutées 5 jours après le semis (ajouter environ 15 mm).

Références bibliographiques

- BELMANS C., WESSELING J., FEDDES R.A., 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil : SWATRE. *J. Hydrol.*, 63 : 271-286.
- CHOPART J.L., 1983. Étude du système racinaire du mil (*Pennisetum typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal. *L'Agron. Trop.*, 38 (1) : 37-51.
- DANCETTE C., 1976. Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Orientation des travaux portant sur les besoins en eau des cultures. *L'Agron. Trop.*, 31 (4) : 321-338.
- DANCETTE C., 1983. Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *L'Agron. Trop.*, 38 (4) : 281-294.
- DECKERS J.A., FEYEN J., DECKERS E.M., GAMA B., 1985. Numerical analysis of measured maize and sorghum grain yield on a ferralic arenosol in the Mtwaru region, south-east Tanzania. *Pédologie*, 35 (1) : 5-22.
- DENMAED O.T., SHAW R.H., 1960. Effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. *Agron. J.*, 52 : 272-274.
- EAGLEMAN J.R., 1971. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Meteorol.*, 8 (4-5) : 385-394.
- FOREST F., 1984. Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. Montpellier, IRAT-CIRAD, 63 p.
- FOREST F., KALMS J.M., 1984. Influence du régime d'alimentation en eau sur la production du riz pluvial. Simulation du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.*, 39 (1) : 42-50.
- FOREST F., REYNIERS F.N., 1986. Proposals for the classification of agroclimatic situations of upland rice in terms of water balance. *In* : Progress in upland rice research, Proceedings of the 1985 Jakarta conference, p. 93-103. Manilla, IRRI.
- FRANQUIN P., FOREST F., 1977. Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.*, 32 (1) : 7-11.
- HAVERKAMP R., VAUCLIN M., VACHAUD G., 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements. 1. Local stand-point. *Soil Sci.*, 137 : 78-90.
- HENRICKSEN B.L., DURKIN J.W., 1985. Humidité disponible, période de végétation et possibilités d'alerte précoce en cas de famine en Ethiopie. *Bull. CIPEA*, 21 : 2-10.
- HIDE J.C., 1954. Observations on factors influencing the evaporation of soil moisture. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 18 : 234-239.
- KEULEN H., 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Wageningen, Pudoc, 176 p. (Simulation Monographs).
- LEMON E.R., 1956. Potentialities for decreasing soil moisture loss. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20 : 120-125.
- PELLERIN S., 1986. Étude d'une série chronologique de rendements en canne à sucre obtenus en Guadeloupe à partir d'un modèle de simulation du bilan hydrique. *Agronomie*, 6 (1) : 91-98.
- REDDY S.J., 1983. A simple method of estimating the soil water balance. *Agric. Meteorol.*, 28 (1) : 1-17.
- RICHARDS L.A., 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, 1 : 318-333.
- RITCHIE J.T., 1972. Model for predicting evaporation from a sown crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.*, 8 : 1204-1213.
- ROBELIN M., 1984. Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse. *In* : Physiologie du maïs, Communications au colloque « Physiologie du maïs » organisé par l'INRA, le CNRS et l'AGPM, Royan, France, 15-17 mars 1983, p. 445-476. Versailles, INRA.
- THEVENET G., COUVREUR F., 1978. Blé et maïs, réponses à un déficit en eau. *Perspect. Agric.*, 16 : 37-50.
- VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO S., THONY J.L., 1978. Méthodes de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Ann. Agron.*, 29 (1) : 1-36.
- VAUCLIN M., HAVERKAMP R., VACHAUD G., 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements. 2. Spatial stand-point. *Soil Sci.*, 137 (3) : 141-148.

Summary

FRETEAUD J.P., POSS R., SARAGONI H. – Adjustment of a water balance model to *in situ* measurements with a neutron probe and tensiometers in maize crops.

The different terms of the water balance were measured with a neutron probe and tensiometers in a soil under a maize crop during three crop seasons. In order to extrapolate in time and space the results obtained the water balance was simulated using an empirical model throughout the experimental period. The model was modified by taking into account the evaporation from a bare soil at the beginning of the cycle and the effect of root dynamics. The aim was to have a better agreement between the evapotranspiration and drainage values observed and those simulated. Results obtained open the way to statistical analyses of water balance terms and a regional study of soil and climate constraints to maize cultivation.

Key words : *Zea mays*, maize, water balance, modeling, evapotranspiration, drainage, available moisture capacity, Togo.

Resumen

FRETEAUD J.P., POSS R., SARAGONI H. – Adaptación de un modelo de balance hídrico a medidas tensiométricas *in situ* bajo cultivo de maíz.

Los distintos términos del balance hídrico han sido estudiados mediante el método tensiométrico bajo cultivo de maíz y a lo largo de tres temporadas de cultivo. Para poder hacer una extrapolación en el tiempo y el espacio de los resultados obtenidos, se ha hecho una simulación del balance hídrico con un modelo empírico relativo a todo el período de experimentación. Para mayor concordancia entre los valores observados y simulados de evapotranspiración y de drenaje, el modelo ha sido modificado a fin de tener en cuenta la evaporación del suelo inculco al principio del ciclo y el efecto de la dinámica de las raíces. Los resultados obtenidos dan lugar a análisis estadísticos sobre los términos del balance hídrico y a un estudio regional de los constreñimientos pedoclimáticos con relación al cultivo del maíz.

Palabras-clave : *Zea mays*, maíz, balance hídrico, modelización, evapotranspiración, drenaje, reserva útil, Togo.