

Amélioration des modèles du bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface

J. ALBERGEL

Centre ORSTOM de Hann, BP 1386, Dakar, Sénégal

P. PEREZ

ISRA, Kaolack, Sénégal

M. VAKSMANN

IER, Bamako, Mali

Résumé - En zone sahélienne, les modèles de bilan hydrique sur parcelles cultivées doivent prendre en compte le ruissellement qui représente sur de nombreux sols plus de 50% de la lame précipitée. Pour calculer le ruissellement, les modèles les plus performants dans cette zone climatique utilisent des valeurs de seuils et des coefficients de ruissellement en fonction de la texture des sols. C'est le cas du modèle Franquin & Forest largement utilisé en Afrique de l'Ouest. La simulation du bilan hydrique par ces modèles avec un pas de temps pentadaire ou décadaire est satisfaisante pour des études climatiques et des zonages. En revanche, la précision de cette simulation est insuffisante lors de l'étude des phénomènes ponctuels. Les travaux menés dans le cadre du réseau de recherche pour la résistance à la sécheresse (R3S) sur les sites de Kasséla au Mali et de Thyse Kaymor au Sénégal montrent que ces imprécisions proviennent d'une mauvaise prise en compte du ruissellement. Des essais de simulation de pluie en milieu cultivé ont permis de mettre en évidence le rôle des caractéristiques de surface sur l'infiltrabilité de l'eau (couvert végétal, activité faunique, microrelief et type d'organisation pelliculaire sur l'horizon le plus superficiel des sols). Un protocole expérimental de simulation de pluie, qui tient compte des caractéristiques des averses tropicales, permet d'exprimer le ruissellement d'un sol par une équation donnant la lame ruisselée en fonction de la hauteur précipitée, d'un indice d'humectation des sols et du produit de la pluie par cet indice. Un ensemble d'expérimentations sur de nombreux bassins versants situés depuis la frange désertique du nord Niger jusqu'aux limites des savanes humides de la Côte d'Ivoire a abouti à une typologie des principaux états de surface des milieux cultivés sahéliens. Une équation moyenne de ruissellement est proposée pour les trois grands types de surfaces cultivées de cette zone climatique. Si on introduit ces équations de ruissellement dans le modèle de bilan hydrique, on aboutit à une simulation nettement

23 OCT. 1991

ORSTOM Fonds Documentaire
N° : 34.755 ex 1
Cote : B p50 M

plus proche de la réalité. La prise en compte de l'état de surface et de son éventuelle modification au cours du cycle cultural permet de mieux cerner le remplissage par palier de la réserve en eau du sol. Cette communication présente la méthode et les résultats de simulation numérique du bilan hydrique obtenus sur parcelle de mil au Mali et sur parcelle d'arachide au Sénégal.

INTRODUCTION

Parler de la gestion d'une ressource aussi aléatoire que les pluies au Sahel semble être une gageure. C'est pourquoi les organismes de développement ont pensé depuis le début du siècle que l'agriculture sahélienne ne pouvait s'intensifier que par des grands programmes d'irrigation.

En 1990, la part de la production alimentaire des cultures pluviales est toujours prépondérante malgré le développement de l'irrigation. Dans un pays très sahélien comme le Sénégal, la production des cultures pluviales (mil, sorgho) s'élevait à 818 000 tonnes pour la campagne 1989/1990 et celle des cultures irriguées (riz, maïs) à 299 000 tonnes (programme AGRHYMET). Les deux grandes cultures industrielles de ce pays sont également pluviales: arachide et coton.

Au début des années 60, les chercheurs de divers instituts agronomiques se sont lancés dans des programmes visant à augmenter l'efficacité des pluies pour l'alimentation hydrique des végétaux. En s'appuyant sur un référentiel scientifique large (agroclimatologie, hydrologie, sciences du sol et agrophysiologie) et en associant différentes échelles (parcelle, bassin versant, région, grande zone climatique) ces chercheurs ouvraient un nouveau champ d'investigation que l'on pourrait désigner par "économie de l'eau de l'agriculture pluviale" (Reyniers & Forest, 1990).

Plusieurs thèmes se rattachent à ce domaine de recherche: évaluation des risques de sécheresse, facteurs agronomiques et génétiques d'adaptation, gestion du ruissellement, etc. Ils ont un besoin commun de connaissance du bilan hydrique des cultures, qui est le pivot du diagnostic de l'agronome en zone de déficit pluviométrique.

De nombreux modèles de simulation numérique du bilan hydrique des cultures ont été mis au point. Marchand (1988) les classent en quatre catégories:

- déterministe-conceptuel;
- déterministe-fonctionnel;
- stochastique-conceptuel;
- stochastique-fonctionnel.

Les modèles les plus utilisés par les agronomes de la zone sahélienne sont ceux du type déterministe fonctionnel parmi lesquels il faut citer celui de Franquin & Forest (1977) diffusé dans de nombreux centres agronomiques de la région. Ces modèles ont l'avantage de fonctionner à partir de données agro-climatologiques facilement mesurables et pour lesquelles il existe un réseau permanent d'observation dans tous les pays de la région.

La simulation du bilan hydrique par ces modèles avec un pas de temps pentadaire ou décadaire est satisfaisante pour des études climatiques et des

zonages. En revanche, la précision de cette simulation est insuffisante lors de l'étude des phénomènes ponctuels. Les travaux menés dans le cadre du Réseau de recherche pour la résistance à la sécheresse (R3S) sur les sites de Kasséla au Mali (culture de mil) et de Thyse Kaymor au Sénégal (culture d'arachide) montrent que ces imprécisions proviennent d'une mauvaise prise en compte du ruissellement.

Une méthode d'estimation du ruissellement, tout en conservant la "fonctionnalité du modèle" a été mise au point et le logiciel de traitement des données et de simulation au pas de temps journalier a été complété (Vaksmann, communication personnelle, 1990).

Nous présentons cette méthode et les résultats obtenus sur deux sites: le premier au Mali où se déroule le programme Sol-Eau-Plante, le second au Sénégal sur le dispositif expérimental du programme DRS Economie de l'eau au Sine Saloum. Ces deux programmes de recherche sont des projets pilotes du réseau R3S.

MATERIEL ET METHODE

Simulation du bilan hydrique d'une culture

La simulation du bilan hydrique suivant Franquin & Forest (1977) est une démarche simplificatrice, dont le but est de permettre d'aborder le plus aisément possible le devenir de l'eau au champ. La réalisation de ce modèle consiste à identifier les mécanismes importants et à les décrire par l'intermédiaire d'une équation ou d'un équivalent physique. Un logiciel de calcul et de représentation graphique est disponible pour sa mise en oeuvre (Vaksmann, comm. pers.).

L'évolution du stock d'eau disponible dans le sol pour une culture peut être décrite par l'intermédiaire d'une équation de bilan entre deux dates. Entre deux dates, la variation du stock d'eau dans le sol (D_s) est égale aux quantités d'eau apportées (pluies pour les cultures pluviales) desquelles sont soustraites les pertes d'eau par drainage, ruissellement et évapotranspiration:

$$D_s = P - D_r - ETR - R$$

- D_s = variation de stock en eau du sol en mm;
- P = pluie en mm;
- D_r = pertes par drainage profond en mm;
- R = ruissellement en mm;
- ETR = évapotranspiration réelle de la culture.

Connaissant les caractéristiques du sol et de la plante, cette équation permet de calculer par récurrence l'évolution de la réserve en eau du sol au jour $J + 1$, S_{j+1} par:

$$S_{j+1} = S_j + P_{j+1} - D_{r,j+1} - ETR_{j+1} - R_{j+1}$$

où P_{j+1} , $D_{r,j+1}$, ETR_{j+1} , R_{j+1} sont respectivement les pluies, le drainage,

l'évapotranspiration et le ruissellement du jour $j + 1$.

La réalisation de la simulation consiste à répéter cette opération chaque jour et à tracer l'évolution des stocks.

Dans l'équation du bilan hydrique:

- La pluie est mesurée.
- Le drainage est considéré comme équivalent à l'excès d'eau lorsque la réserve est pleine (débordement du réservoir). Cette hypothèse sous-entend un drainage rapide des pluies excédentaires.
- L'évapotranspiration réelle est calculée à partir de la demande évaporative (ETP), du coefficient cultural (Kc) et du niveau de remplissage de la réserve utile. Quand le sol s'assèche, le taux d'évapotranspiration diminue et les pertes en eau sont, en général, inférieures à l'évapotranspiration maximale ETM. De nombreuses formules ont été définies pour quantifier l'ETR en fonction de l'assèchement du sol. Le modèle Franquin & Forest utilise la formule polynomiale d'Eagleman (1971) qui tient compte à la fois du remplissage de la réserve utile et de l'intensité de la demande évaporative.
- Le ruissellement est souvent négligé dans ces modèles. Le modèle Franquin & Forest permet d'estimer le ruissellement en fixant un seuil minimum de pluie au-dessus duquel apparaît le ruissellement qui est alors égal à un pourcentage fixe de la pluie. Cette formulation n'est pas satisfaisante au Sahel. La comparaison des stocks d'eau simulés et ceux mesurés montre que le ruissellement ne peut être un taux constant de la pluie. Pour mettre au point une méthode de ruissellement qui rende mieux compte de la réalité, nous avons utilisé les techniques de simulation de pluie mises au point pour l'étude de la genèse des crues au Sahel (Albergel, 1987).

La simulation de pluie

Le simulateur de pluie utilisé dans les expérimentations poursuivies sur le site de Thyse Kaymor dérive de l'appareil mis au point par Asseline & Valentin (1978) dont les fonctions ont été automatisées. Il permet de réaliser une averse dont on programme les intensités par plage de temps variable sur une parcelle de 1 m^2 (Fig. 1). Cette averse a les caractéristiques de pluies types dont on connaît les récurrences. Les intensités, durées, fréquences et l'énergie cinétique des gouttes de pluie lors de leur impact avec le sol sont celles des pluies de récurrence annuelle et décennale de la région étudiée (Casenave, 1982). Un moteur, "hybride pas à pas", piloté par un microprocesseur permet de faire osciller un gicleur calibré qui est alimenté avec une pression constante. L'intensité de pluie reçue par la parcelle est fonction de l'angle d'oscillation du gicleur. Le ruissellement est mesuré sur un limnigraphe de précision et la progression du front d'infiltration peut être suivie avec une sonde à neutrons et une batterie de tensiomètres.

Une série de cinq pluies simulées séparées par des temps de ressuyage

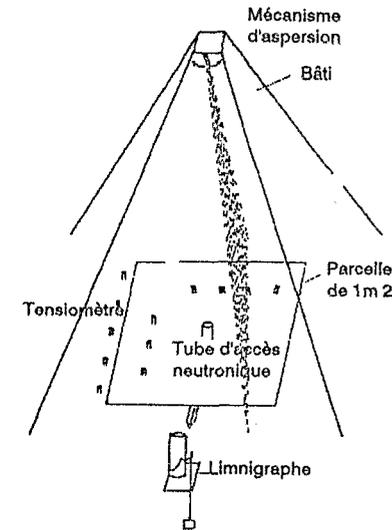


Fig. 1 Simulation de pluie.

plus ou moins longs permet d'établir l'équation de ruissellement de la parcelle considérée. Cette équation exprime la lame ruisselée en fonction de la pluie et d'un indice dérivant des hauteurs successives de pluie et des temps de ressuyage. Cet indice est de la forme:

$$IK(n) = (IK(n-1) + P(n-1)) \exp(-0.5t)$$

où IKn est l'indice au début de la pluie n (Pn) et t le temps (en jours) séparant deux averses consécutives.

La Fig. 2 représente les lames ruisselées (Lr) résultant d'un protocole de pluies comprenant deux averses de récurrence décennale et trois averses de récurrence bisannuelle sur une parcelle de bas de pente sableux dans un ancien champ d'arachide.

La détermination de la relation $Lr(P, IK)$ se fait en deux étapes pour chaque parcelle. Pour chaque pluie, on calcule les paramètres de la relation $Lr = aP + b$ sur la partie linéaire de la courbe de ruissellement correspondant à un régime permanent de ruissellement. On établit ensuite par régression linéaire les droites $a(IK)$ et $b(IK)$. Le résultat final est une fonction de la forme:

$$Lr = aP + b P IK + c IK + d$$

Pour la parcelle prise en exemple dans la Fig. 2 l'équation est:

$$Lr = 0.4 P + 0.00353 P IK + 0.0219 IK - 5.63$$

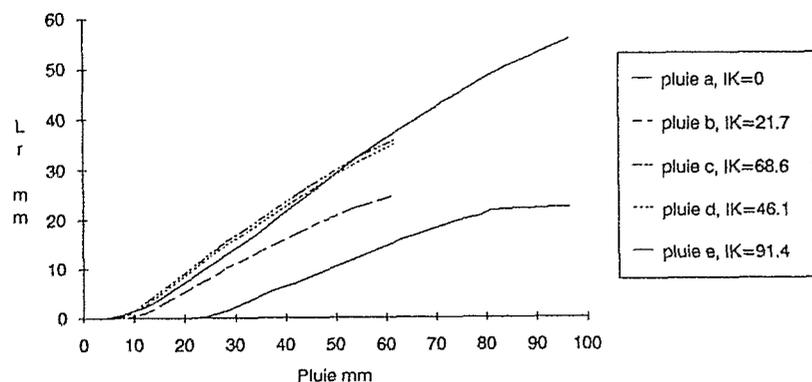


Fig. 2 Lames ruisselées sous simulation de pluie parcelle KD12.

Un tel protocole de pluie simulée a été réalisé sur 247 parcelles situées sur un transect nord sud depuis les franges pré-désertiques du nord Niger jusqu'aux savanes humides du nord de la Côte d'Ivoire (Casenave & Valentin, 1989). Une description codifiée de chacune de ces parcelles a permis de comparer statistiquement les paramètres hydrodynamiques et les paramètres de sols et d'états de surface (Albergel *et al.*, 1985).

Pour le milieu sahélien les parcelles en milieu cultivé se regroupent en trois grands types, fonction de la nature des croûtes de surface. Le critère retenu dans le classement Casenave & Valentin (1989) est l'abondance de la porosité vésiculaire dans la croûte. Lors des pluies, l'organisation de surface des sols réduit non seulement l'infiltration mais aussi la sortie de l'air qui, emprisonné dans la croûte, forme alors des bulles. Celles-ci conservent leur forme au cours des dessiccations, d'où l'abondance des petites cavités sphériques ("des vésicules"). Les trois types de surface en milieu cultivé sont les suivants:

- Type C1: porosité vésiculaire absente ou très faible (5%);
- Type C2: porosité vésiculaire peu abondante (5 à 30%);
- Type C3: porosité vésiculaire forte (>30%).

Chacun de ces types possède des variantes tenant compte du couvert végétal, du taux d'éléments grossiers, de la texture et du micro-relief. On peut cependant adopter les équations moyennes de ruissellement suivantes:

- Type C1: $L_r \text{ (mm)} = 0.2 P + 0.03 IK + 0.004 PIK - 3$
- Type C2: $L_r \text{ (mm)} = 0.35 P + 0.04 IK + 0.004 PIK - 3$
- Type C3: $L_r \text{ (mm)} = 0.9 P + 0.05 IK + 0.002 PIK - 10$

Pour calculer la lame ruisselée de chaque pluie sur un site donné il suffit donc de reconnaître le type de surface, la valeur de la lame précipitée et celle du coefficient IK précédent cette pluie.

RESULTATS

Validation de la fonction de ruissellement

Afin de valider la fonction de ruissellement dans le modèle BIPODE, les résultats de la simulation de pluie réalisée sur le bassin versant de Keur Dianko à Thyse Kaymor, en février 1989 ont été repris. Les variations des lames infiltrées mesurées *in situ* par prélèvements gravimétriques et suivi neutronique ont été comparées à celles calculées par le modèle avec la fonction de ruissellement obtenue à partir des lames précipitées (L_p) et ruisselées (L_r) mesurées sur la parcelle.

Pour la parcelle KD12, l'évolution des stocks hydriques à la côte 150 cm est représentée dans la Fig. 3. On remarquera la bonne adéquation du modèle malgré une période de simulation assez faible. Une légère modification de l'algorithme de base a été nécessaire, afin de tenir compte de la forte évaporation sol nu de la parcelle dans un environnement à ETP élevée.

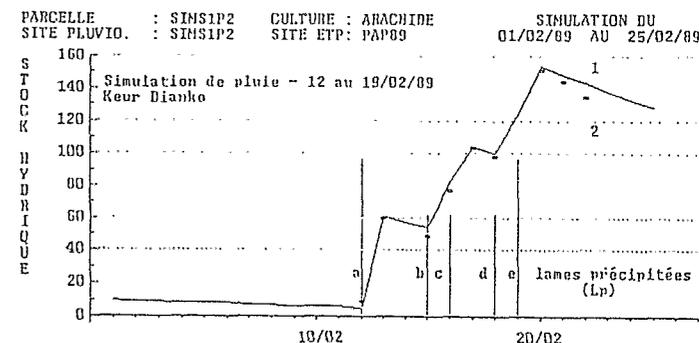


Fig. 3 Evolution du stock (0-150 mm): (1) modèle avec L_r type ORSTOM et (2) suivi neutronique.

Pour évaluer le gain de précision obtenu par cette fonction de ruissellement, les résultats ont été également comparés à une simulation classique, où le ruissellement est calculé par un coefficient constant à partir d'un seuil de pluie (sol sableux).

Afin de pouvoir généraliser et rendre fonctionnelle la méthode, il était intéressant de voir comment fonctionnait le modèle en prenant l'équation de ruissellement donné par le catalogue des états de surface pour le type de parcelle considérée (Casenave & Valentin, 1989).

Le Tableau 1 résume les différentes caractéristiques du bilan hydrique pour trois types de simulations testées:

- lame ruisselée type ORSTOM, établie localement: $L_r = 0.4P + 0.0035PIK + 0.022IK - 5.63$;

Tableau 1 Simulations BIPODE sur KD12

Type	Pluie (mm)	Drainage (mm)	Ruissellement (mm)	Stock final (mm)
ORSTOM local	378	0	194	128
ORSTOM C2	378	16	177	129
Seuil	378	109	84	129

- lame ruisselée type ORSTOM, C2 du catalogue: $Lr = 0.35P + 0.004PIK + 0.04IK - 3.0$;
- lame ruisselée type Seuil à coefficient constant: $S = 20$ mm $Kr = 30\%$.

Les mesures d'humidité du sol lors de l'expérience confirment l'absence de drainage profond, la modification du modèle proposée améliore nettement la discrimination entre ruissellement et drainage. On remarque également que l'utilisation de l'équation de ruissellement établie sur la parcelle et celle du catalogue donnent des résultats peu différents.

Les termes du bilan sur des périodes plus longues, le cycle cultural par exemple, peuvent être affectés plus ou moins gravement par une sous-estimation des pertes de surface, selon les conditions pluviométriques de la saison. Les deux exemples qui suivent illustrent cet état de fait.

Application de la méthode au cycle cultural

Le programme Eau-sol-plante de l'Institut d'Economie Rurale (IER), Bamako, poursuit des études concernant les reports d'eau sur une toposéquence depuis 1987, sur le site de Kasséla. Un suivi régulier des stocks hydriques est effectué par méthode neutronique. Aucune mesure directe du ruissellement n'est réalisée, on compare simplement les stocks mesurés et modélisés par le logiciel BIPODE.

En 1988, l'hivernage s'installe réellement le 9 juillet avec une pluie de 98.5 mm; le cumul des précipitations atteint 400 mm à la fin du mois. Les sols ferrugineux de bas de toposéquence, de texture sableuse, possèdent une bonne réserve utile (150 mm sur 1 m) retenue sous de faibles succions. Dans ces conditions, le profil doit s'humecter rapidement. Or les mesures neutroniques montrent que le remplissage s'effectue par paliers, la cote 200 cm étant franchie fin septembre. Les pertes de surface ont eu une influence considérable sur la recharge hydrique.

La Fig. 4 représente l'évolution du stock hydrique d'une parcelle de mil Souna, semée le 10 juillet. La profondeur de calcul correspond à la cote maximum de descente du front d'humectation (250 cm), afin de pouvoir négliger le terme de drainage. On constate que le modèle classique envisage un remplissage très rapide de la réserve du sol, infirmé par les mesures de terrain. Les pertes, fictives, en profondeur s'élèvent à 150 mm.

L'observation des états de surface de la parcelle d'étude (Rousseau,

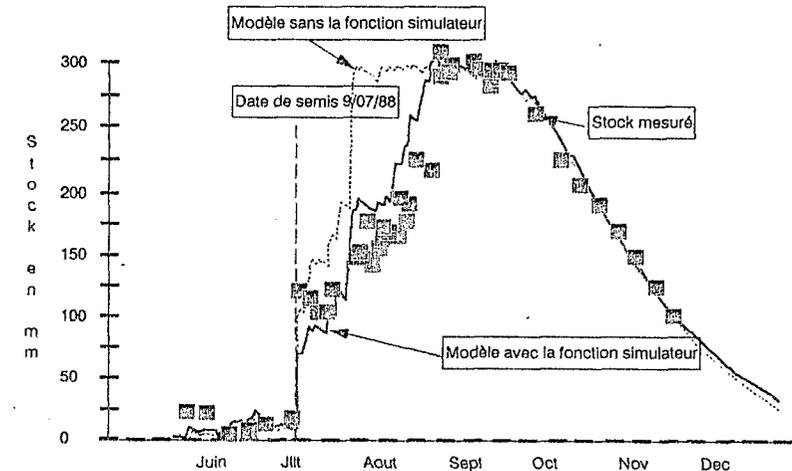


Fig. 4 Bilan hydrique parcelle bas de pente, à Kasséla (Mali).

1988) permet de classer celle-ci dans le type C1 du catalogue ORSTOM. L'équation de ruissellement correspondante est introduite dans le modèle, sur tout le cycle cultural. L'adéquation aux données expérimentales est nettement améliorée. Les pertes par ruissellement sont évaluées à 156 mm. Quelques décalages subsistent toutefois, difficiles à interpréter actuellement.

Cet exemple met en évidence l'importance d'une prise en compte du ruissellement, dans la zone sahélienne, pour établir un bilan hydrique réaliste. Une interrogation demeure concernant la généralisation de l'approche proposée; le second exemple étudié confirme ces premiers résultats et permet d'envisager un affinement du modèle.

Amélioration de la fonction de ruissellement sur parcelle cultivée

Le programme Economie de l'Eau de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), à Kaolack, étudie depuis 1984 l'impact du ruissellement sur l'érosion et sur le bilan hydrique des cultures à différentes échelles. Ruelle et al. (1989) démontrent qu'une partie conséquente des flux de surface d'une toposéquence naît au sein même des parcelles cultivées, tout au long du cycle cultural. Le rôle déterminant des états de surface dans les phénomènes de blocages des flux verticaux est mis en évidence par Albergel et al. (1989).

Le site de Keur Dianko, au sud du bassin arachidier sénégalais, a enregistré une pluviométrie moyenne de 750 mm en 1989. Sur trois parcelles formant un micro-bassin versant de 2.4 ha, le ruissellement est enregistré, à l'échelle du m², en divers points représentatifs des états de surface rencontrés. Une série de simulations de pluie permet d'associer chaque zone à une fonction de ruissellement C1 ou C2.

L'exemple proposé concerne le site S43, représentatif d'une zone intermédiaire C1/C2, à sol ferrugineux de texture sableuse à sablo-argileuse en profondeur. La réserve utile avoisine 10 mm/10 cm, la conductivité hydraulique en profondeur a été appréciée par drainage interne à la cote 170 cm (Perez & Sarr, 1990). En 1989, on enregistre 772 mm de pluie et 82 mm de ruissellement, lors de hivernage particulièrement favorable. L'arachide est semée le 16 juin et récoltée le 18 octobre.

La Fig. 5 illustre l'évolution du stock hydrique à la cote 170 cm. Cette simulation permet de vérifier le calage du modèle:

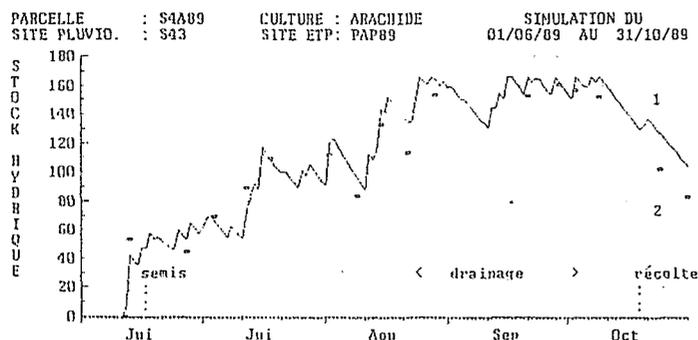


Fig. 5 Evolution du stock (0-170 mm): (1) modèle fonction de la lame infiltrée, (Li) (2) suivi neutronique, culture arachide.

- quatre années de suivi neutronique permettent de connaître la RU: 170 mm;
- le drainage à la côte d'enracinement maximum (170 cm) est estimé de deux manières, par différences de stocks mesurés et par application de la loi de Darcy: $D = 15 \text{ à } 20 \text{ mm}$;
- la lame infiltrée $Li = Lp - Lr$ est introduite comme pluviométrie, sans fonction de ruissellement.

Le calage est correct sur la majeure partie du cycle, compte tenu de la précision de la méthode neutronique et des limites inhérentes à l'utilisation des coefficients culturaux. Le Tableau 2 regroupe les principales caractéristiques de la simulation; le drainage est surestimé (34 mm) en fin de cycle.

Dans un second temps la pluviométrie réelle est réintroduite dans le modèle, accompagnée d'une fonction de ruissellement de type C1. Les variables de sortie sur le cycle restent acceptables, mais le début de la phase de remplissage sous-estime les pertes de surface (Tableau 2). L'utilisation d'une autre équation n'améliore pas la simulation.

Il est aisé d'imaginer que l'évolution du ruissellement sous un couvert végétal en croissance et soumis aux interventions culturales ne puisse s'exprimer de manière univoque. Dans un souci d'affinement de la méthode proposée, sans perdre de vue l'aspect fonctionnel, une approche séquentielle a

Tableau 2 Simulations du bilan hydrique sur le site S43

Type	Lp (mm)	Lr_{juin} (mm)	Lr_{juil} (mm)	Lr_{totale} (mm)	Drainage (mm)	ETR (mm)	Stock final (mm)
$Lr_{\text{mesuré}}$	770	50	18	84	32	553	101
Lr_{univoque}	770	25	13	73	36	560	101
$Lr_{\text{séquentiel}}$	770	48	16	99	17	552	102

été tentée. Trois périodes sont retenues:

- du 12 au 14 juin: sol pulvérulent et piétiné, bonne infiltrabilité, équation C1;
- du 15 juin au 10 juillet: surface obturée et faible développement végétatif, équation C2;
- du 11 juillet au 31 octobre: développement végétatif suffisant, équation C1.

La Fig. 6 visualise la simulation réalisée selon la séquence décrite, le tracé d'ensemble est correct. Le drainage est sous-estimé par rapport à la première simulation, mais l'évolution de la lame ruisselée est mieux respectée (Tableau 2).

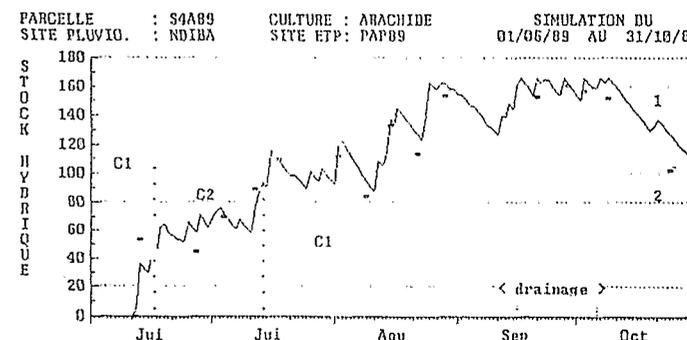


Fig. 6 Evolution du stock (0-150 mm): (1) modèle type ORSTOM séquentiel, (2) suivi neutronique, culture arachide.

L'erreur engendrée par le modèle univoque est faible, dans les conditions de l'hivernage 1989, mais elle affecte le terme ETR essentiel pour l'agronome. Cet écart est d'autant moins décelable sans un suivi régulier de terrain qu'il a lieu lors de la phase de remplissage.

Cet exemple constitue une première approche, certes vérifiée sur d'autres sites, mais qui demande une réflexion plus poussée concernant la définition des périodes, l'établissement d'un référentiel spécifique sous couvert végétal, les limites de fonctionnalité d'une telle approche.

DISCUSSION - CONCLUSION

Représentativité du modèle

Dans son étude stochastique d'un modèle déterministe-fonctionnel, proche de BIPODE, Marchand (1988) démontre la faible variabilité des données de sortie (ETR, D_r) lorsque les valeurs moyennes des variables d'entrée sont correctement évaluées (RU , K_c , C_f). Néanmoins, la sensibilité du modèle dépend fortement du spectre pluviométrique utilisé; d'autre part, une faible variabilité globale sur le cycle cache parfois de fortes variations sur des périodes plus courtes (analyse décennale). L'auteur déplore l'association abusive des termes de drainage et de ruissellement, source d'incertitude supplémentaire.

Si la détermination d'une valeur représentative - à l'échelle d'étude - de la RU a fait l'objet de nombreux travaux, il apparaît que toute modification du spectre de pluie va influencer directement sur la sensibilité des coefficients cultureux et sur la précision du modèle. Cela d'autant plus que les pertes de surface seront négligées: l'algorithme est alors faussé puisque l'eau excédentaire est affectée au calcul de l'ETR avant de disparaître par drainage.

Deux possibilités s'offrent à nous afin d'améliorer le modèle:

- simuler les pertes de surface, option choisie pour le logiciel BIPODE;
- simuler les pertes par drainage, option choisie pour le logiciel PROBE (Chopart & Siband, 1988).

Chaque voie n'est pas exclusive, il faut pourtant remarquer que la modélisation des flux profonds se heurte à deux problèmes. Le premier réside dans la détermination de la loi $K(\theta)$ qui demande une expérimentation lourde dont les résultats ont une incertitude non négligeable, fonction du type de sol (Poss & Saragoni, 1986). Le second, est lié à la forte variabilité spatiale de $K(\theta)$, paramètre de flux (Vauclin, 1983).

Dans le souci d'améliorer le modèle originel, l'équipe Chopart, Siband qui travaille en Côte d'Ivoire (milieu humide) s'est attachée à une caractérisation plus fine du drainage profond, tandis que les équipes sahéliennes se sont dirigées vers les problèmes de ruissellement. Cette remarque rejoint les résultats de Casenave (1985) qui montre que le ruissellement est d'autant plus conditionné par la saturation du profil de sol que la région est humide et qu'il est exclusivement lié à nature des états de surface dans le Sahel pré-désertique.

Enfin, l'établissement des équations $L_r = f(P, IK)$, selon le protocole actuel, se base sur un spectre de pluies et d'intensités représentatif de la zone étudiée.

Fonctionnalité de la méthode

Le catalogue des états de surface (Casenave & Valentin, 1989) est un outil précieux qui permet de caler le modèle dans sa phase initiale, en respectant les clés de détermination proposées. Par contre, dès la mise en culture et le

démarrage végétatif, une nette discontinuité apparaît dans les phénomènes observés (Boiffin et al., 1988). On peut citer:

- la diminution du rôle des pellicules de surface au profit du couvert végétal;
- la contribution plus importante du stock hydrique au blocage des flux verticaux, au fur et à mesure de son remplissage.

Ce constat nous a conduit à proposer une étude expérimentale du type de celle du catalogue des états de surface, mais plus spécifique au milieu cultivé. Elle devrait comprendre une série de simulations de pluies sur des états de surface différents pour les grands types de cultures pluviales du Sahel (mil, sorgho, arachide, coton) et aux différents stades du calendrier cultural. L'état de surface étant nettement lié au climat et au type de culture, le nombre de cas ne devrait pas être trop grand. Cette étude devrait aboutir à trois équations de ruissellement en fonction de l'état de croissance de la végétation pour les principales cultures du Sahel.

Ce référentiel de "ruissellement" pourrait alors s'intégrer au modèle BIPODE, améliorer les résultats de simulation tout en conservant la fonctionnalité du modèle.

Une autre amélioration du modèle consisterait à introduire deux autres indices récurrents pour rendre compte d'une part de l'augmentation de la LAI (indice de surface foliaire) et d'autre part du rôle croissant des phénomènes de saturation du profil en fin de saison des pluies pour les régions le plus humides du Sahel.

REFERENCES

- Albergel, J. (1987) Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m^2 au km^2 . Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. Etudes et Thèses de l'ORSTOM.
- Albergel, J., Ribstein, P. & Valentin, C. (1985) L'infiltration: quels facteurs explicatifs? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. *Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier, Collection. ORSTOM, Colloques et Séminaires*, 25-48.
- Albergel, J., Bernard, A., Ruelle, P. & Touma, J. (1989) Hydrodynamique des sols - bassins versants expérimentaux de Thyse Kaymor. *Rapport de Campagne de Mesures, Février-avril 1988, ORSTOM, Dakar*.
- Asseline, J. & Valentin, C. (1978) Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, série Hydrol. XV* (4), 321-349.
- Boiffin, J., Papy, F. & Emberck, M. (1988) Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré - Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie* 8 (8), 663-673.
- Casenave, A. (1982) Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes d'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, série Hydrol. XIX* (4), 207-227.
- Casenave, A. (1985) Programme d'analyse du ruissellement, de l'infiltration et de l'érosion à l'aide des techniques de simulation de pluie. *Journées Hydrologiques de Montpellier, Collection ORSTOM*, 10-17.
- Casenave, A. & Valentin, C. (1989) Les petats de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Edition de l'ORSTOM, Collection didactiques.
- Choppard, J. L. & Siband, P. (1988) PROBE: Programme de bilan de l'eau. *Mém. et Travaux de l'IRAT no. 17*.
- Eagleman, J. R. (1971) An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Met.* 8, 385-394.
- Franquin, P. & Forest, F. (1977) Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle du bilan hydrique. *Agron. Trop.* 32 (1), 7-11.
- Marchand, D. (1988) Modélisation fonctionnelle du bilan hydrique sur sol cultivé: approche

- déterministe ou stochastique? Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Perez, P. & Sarr, P. S. (1990) Programme gestion des ressources naturelles. Rapport d'activité "Economie de l'Eau - DRS" Année 1989, multigr Kaolak.
- Poss, R. & Saragoni (1986) Choix d'une méthode d'approche du bilan hydrique en plein champ. 11^{ème} Journées Groupe Français d'Humidité Neutronique GFHN Angers Com. no. 18 ORSTOM, IRAT.
- Reyniers, F. N. & Forest, F. (1990) La pluie n'est pas le seul remède à la sécheresse en Afrique. Sciences et changements planétaires. *Sécheresse* 1 (1), 36-42.
- Rousseau, V. (1988) Suivi hydrique à l'échelle d'une toposéquence et ajustement d'un modèle de simulation du bilan hydrique. Diplôme d'Agronomie Tropicale à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
- Ruelle, P., Séné, M. & Perez, P. (1989) Etude expérimentale et modélisation du bilan hydrique d'un bassin versant en zone soudano-sahélienne. Dans: *Influence à l'Echelle Régionale des Couverts Pédologiques et Végétaux sur les Bilans Hydriques et Minéraux des Sols*, 31-50. ATP-PIREN 86-89 rapport final IMG/UM.
- Vauclin, M. (1983) Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. Dans: *Coll. Soc. Hydrotechnique France, INRA, Gr. Travail Dispersion en Milieux Poreux* (Avignon, juin 1982), 9-49. Coll. de l'INRA no. 15, INRA, Paris.