

MODÉLISATION DES INTERACTIONS SURFACE/ATMOSPHÈRE EN ZONE DE SAVANE HUMIDE

X. LE ROUX¹, A. TUZET², O. ZURFLUH², J. GIGNOUX¹, A. PERRIER², B.A. MONTENY³

RÉSUMÉ

L'évolution saisonnière des termes du bilan radiatif, du bilan d'énergie et la production primaire d'une savane humide d'Afrique de l'ouest (Lamto, Côte d'Ivoire) a été suivie dans le cadre du programme SAVanes à Long Terme (SALT). Ces données ont permis de développer un modèle de simulation des échanges surface/atmosphère en savane humide, basé sur les relations fonctionnelles existant entre la production et la phénologie de la savane d'une part, et les bilans d'énergie et hydrique de ce type de surface d'autre part. Ce modèle est issu du couplage de deux sous-modèles fonctionnant au pas de temps journalier et utilisant des variables climatiques standard en entrée : le modèle de bilan d'énergie et bilan hydrique du sol développé par la chaire de bioclimatologie de l'Institut National Agronomique (TUZET *et al.*, 1992) ; et un modèle de production primaire (modèle de Monteith modifié). L'aptitude du modèle à rendre compte des variations saisonnières du stock en eau du sol et de la phénologie de la végétation est étudiée. L'utilisation de ce modèle pour simuler l'évapotranspiration à l'échelle d'un bassin versant situé dans la même zone de savane humide et étudié par l'Orstom (Sakassou, Côte d'Ivoire) est discutée. L'importance du recyclage de l'eau précipitée par évapotranspiration, et donc du contrôle biologique qui lui est associé, est soulignée pour les différents types de végétation naturelle en Afrique de l'ouest.

¹École Normale Supérieure, Laboratoire d'Écologie (URA 258 CNRS), 46 rue d'Ulm, 75005 Paris, France.

²Chaire de bioclimatologie, station de bioclimatologie Inra, 78000 Thiverval-Grignon, France.

³Laboratoire de bioclimatologie, Orstom, 911 av. Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier, France.

INTRODUCTION

Les relations existant entre le climat et les écosystèmes continentaux ont longtemps été réduites à la notion d'état d'équilibre statique *e.g.* (HOLDRIDGE, 1947). La prise de conscience des modifications climatiques, hydrologiques et écologiques résultant de l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère et des changements de mode d'utilisation des terres a amené à revoir cette vision des choses. Des travaux récents, tant en hydrologie qu'en météorologie, ont montré que les rapports biosphère/atmosphère ou biosphère/hydrosphère sont fondamentalement dynamiques et interactifs. L'importance de la régulation qu'exerce la végétation sur les échanges de vapeur d'eau est ainsi reconnue dans les modèles de bilan hydrologique récents (ABBOTT *et al.*, 1986 ; WIGMOSTA *et al.*, 1994). De même, l'importance des paramètres de surface sur le fonctionnement du système climatique a été observée lors d'expériences de sensibilité des modèles de climat (SHUKLA et MINTZ, 1982 ; MINTZ, 1984). L'évapotranspiration apparaît ainsi comme un terme essentiel à bien simuler (MINTZ, 1984).

Cependant, s'il est vrai que les modèles hydrologiques ou météorologiques prennent maintenant en compte la végétation, cette végétation est vue comme un élément purement statique qui régule les échanges entre la surface et l'atmosphère. En réalité, il s'agit d'un élément dynamique, dont les réactions aux changements d'environnement (régime pluviométrique par exemple) sont susceptibles de constituer un élément important du contrôle en retour qu'exerce la végétation sur le bilan hydrologique et le climat. Par exemple, les variations interannuelles du régime hydrologique sont susceptibles d'entraîner des variations concomitantes de phénologie (évolution saisonnière de l'indice foliaire), dont l'effet en retour sur le bilan hydrologique est potentiellement important. Actuellement, ce problème n'est pas résolu et les modèles mécanistes opérant aux échelles du bassin versant (*e.g.* ABBOTT *et al.*, 1986 ; WIGMOSTA *et al.*, 1994) ou de la maille de modèle de circulation générale (DICKINSON *et al.*, 1986 ; SELLERS *et al.*, 1986 ; DUCOUDRÉ *et al.*, 1993) ne tiennent pas compte du contrôle en retour qu'exerce le caractère dynamique de la phénologie des écosystèmes sur le bilan d'énergie et le bilan hydrologique des zones continentales. Une solution pour tenir compte de ce mécanisme est de suivre la phénologie par télédétection et de l'imposer comme variable d'état aux modèles de surface. Cette approche est difficilement applicable à certaines régions (zone guinéenne par exemple) où la nébulosité rend toute acquisition de données difficile ; plus encore, cette approche utilisée sans tenir compte des processus sous-jacents limite toute réelle compréhension des interactions entre les systèmes biologique, hydrologique et climatique, et réduit considérablement le caractère prédictif des modèles. Une alternative consiste à coupler un modèle de phénologie (et donc de production primaire) relativement simple aux modèles hydrologiques ou météorologiques.

Le travail présenté ici illustre l'intérêt de ce type d'approche. Un modèle paramétrique de phénologie et production primaire (modèle de Monteith modifié) est couplé au modèle hydrique développé par PERRIER (1973) et TUZET *et al.* (1992) pour simuler le bilan d'énergie et le bilan hydrique d'une savane humide (Lamto, Côte d'Ivoire). Les premiers résultats de simulation de la phénologie et du bilan hydrologique en zone guinéenne sont présentés. L'importance du terme évapotranspiration dans le bilan hydrologique de ce type de surface est souligné, et les perspectives d'utilisation du modèle sont évoquées.

LE SITE D'ÉTUDE

Le climat de la station de Lamto est un climat équatorial de transition. La précipitation annuelle moyenne est de 1 200 mm d'eau par an. Ce chiffre cache cependant une forte variabilité interannuelle : les précipitations annuelles varient de moins de 800 mm à 1 700 mm et la variabilité interannuelle des précipitations mensuelles est également importante (PAGNEY, 1988). Une grande saison sèche existe de décembre à janvier, et une saison des pluies de février à novembre, généralement interrompue en août par une petite saison sèche. Durant la saison des pluies et surtout la petite saison sèche, la nébulosité est souvent importante et réduit considérablement le rayonnement solaire arrivant au sol (LE ROUX *et al.*, 1994). Le site d'étude est une savane arbustive moyennement ouverte à andropogonées, sur sol ferrugineux tropical sur roche mère granitique, située sur un plateau en pente douce (0 à 4 %). Le sol est sableux et un horizon gravillonnaire se rencontre à partir de 70 cm de profondeur. Le passage du feu, mi-janvier, détruit la quasi-totalité de la phytomasse herbacée épigée.

PRÉSENTATION DU MODÈLE

Le modèle est explicitement basé sur les relations fonctionnelles existant entre les bilans énergétique et hydrique d'une part, et la production primaire donc la phénologie d'autre part.

La structure du modèle est détaillée à la figure 1.

Le modèle fonctionne au pas de temps journalier et comporte :

- un sous-modèle de production (modèle de Monteith) qui simule l'évolution saisonnière de la biomasse et de la nécromasse, et l'évolution des indices foliaires vivant et mort ;
- des sous-modèles de bilan radiatif, bilan d'énergie et bilan hydrique du sol (modèle de TUZET *et al.*, 1992, adapté au site) qui simule d'une part l'évapotranspiration journalière en distinguant l'évaporation du sol et la transpiration des plantes, et d'autre part la réserve en eau de l'horizon

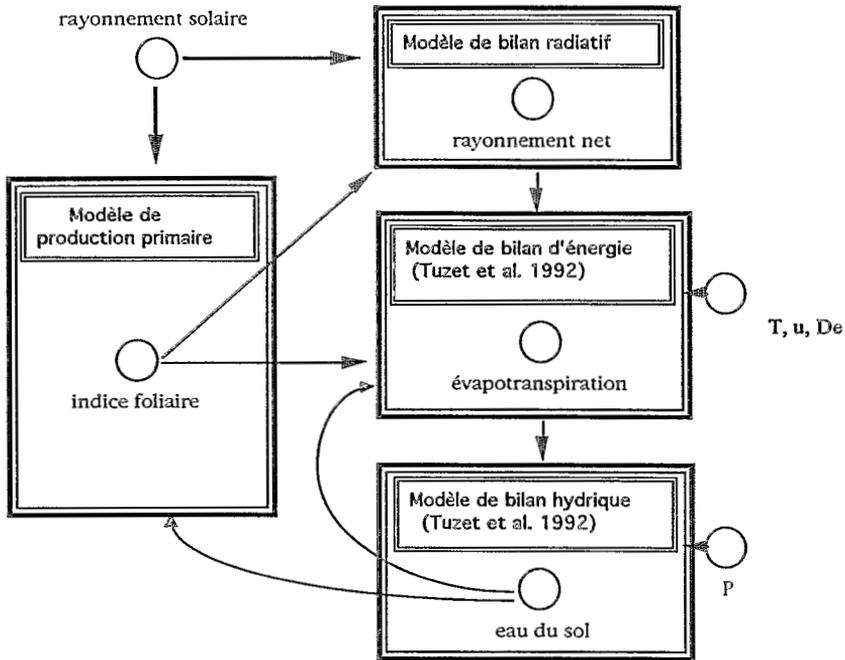


Figure 1 :
Structure simplifiée du modèle.

0-60 cm. LE ROUX *et al.* (1995) ont en effet montré par des mesures isotopiques que cet horizon est celui où les plantes puisent l'essentiel de leur eau.

Le sous-modèle de production primaire est sous le contrôle du bilan hydrique simulé, l'efficacité de conversion du modèle de Monteith et le taux de mortalité dépendant de l'état de la réserve en eau du sol. Les sous-modèles de bilan d'énergie et de bilan hydrique sont sous le contrôle de la phénologie simulée, l'énergie disponible et l'évapotranspiration dépendant de l'indice foliaire.

LE SOUS-MODÈLE DE PRODUCTION PRIMAIRE ET DE PHÉNOLOGIE

La production primaire PP (g matière sèche j^{-1}) est simulée suivant le modèle de Monteith. (MONTEITH, 1972 ; 1977) :

$$PP = \int_t e_b (IF, Reau/Rco) e_a (IF) e_c R_s dt \quad (1)$$

où R_s est le rayonnement solaire journalier ($MJ j^{-1}$), e_c l'efficacité climatique journalière (rapport PAR/ R_s), e_a est l'efficacité journalière d'absorption du rayonnement PAR par le couvert végétal (PAR_a/PAR), et e_b est l'efficacité

journalière de conversion du rayonnement PAR absorbé en matière sèche (g matière sèche MJ⁻¹ PARa j⁻¹). Les efficacités de ce modèle ont été mesurées durant plus d'un cycle annuel à Lamto en 1993 et 1994 (Gauthier, Le Roux et Begué, non publié). L'efficacité d'absorption est paramétrée en fonction de l'indice foliaire IF , et l'efficacité de conversion est fonction de la phénologie et de la disponibilité en eau du sol.

L'évolution saisonnière de la biomasse B (gm⁻² j⁻¹) et de la nécromasse N (gm⁻² j⁻¹) est simulée suivant :

$$B_j = B_{j-1} - \Gamma_M * B_{j-1} + PP + ALLOC \quad (2)$$

$$N_j = N_{j-1} + \Gamma_M * B_{j-1} - \Gamma_D * N_{j-1} \quad (3)$$

où Γ_M est le taux journalier de mortalité de la biomasse calculé en fonction de la disponibilité en eau du sol, $ALLOC$ le taux journalier d'allocation des parties épigées vers les parties souterraines en début de cycle après le feu, Γ_D est le taux journalier de disparition de la nécromasse. Les paramétrisations utilisées ont été obtenues par LE ROUX (1995) sur le site d'étude.

Les indices foliaires vivant IF et mort IF_m sont calculés chaque jour en fonction de la biomasse B et de la nécromasse N respectivement, en tenant compte de l'évolution saisonnière des masses surfaciques vivante et morte (LE ROUX, 1995).

LE SOUS-MODÈLE DE BILAN D'ÉNERGIE

L'évapotranspiration de la savane est simulée à l'aide du modèle développé par PERRIER (1973) et TUZET *et al.* (1992). Ce modèle calcule l'évapotranspiration en sommant deux termes considérés comme indépendants : la quantité d'eau transpirée par les plantes, et celle évaporée par le sol :

- l'évaporation du sol est calculée suivant le modèle de mulch proposé par PERRIER (1973). Elle est égale à l'évaporation potentielle juste après une pluie, puis rapidement freinée quand le sol se dessèche en surface. PERRIER (1973) a montré que l'évaporation du sol cumulée depuis la dernière pluie est reliée à la somme cumulée des évaporations potentielles ;
- en conditions de bonne alimentation en eau, c'est-à-dire lorsque la réserve en eau du sol est comprise entre la réserve à la capacité au champ et une réserve limite, la transpiration du couvert végétal λE_c est calculée en fonction de la transpiration potentielle λEP_c suivant :

$$\lambda E_c = a_o \lambda EP_c \quad (4)$$

où a_o est un coefficient dépendant essentiellement de l'indice foliaire vivant et de la résistance stomatique minimale du couvert (TUZET *et al.*, 1992). Lorsque la réserve en eau du sol est inférieure à la réserve en eau limite R_p , la réduction de la transpiration est supposée être proportionnelle à la réduction de la quantité d'eau disponible :

$$\lambda E_c / (a_o \lambda EP_c) = (R - R_{pp}) / (R_l - R_{pp}) \quad (5)$$

la transpiration du couvert s'annule lorsque la réserve en eau atteint la valeur du point de flétrissement permanent R_{pp} .

L'évapotranspiration totale λE de la surface est calculée comme la somme de l'évaporation du sol λE_s et de la transpiration des plantes λE_c , pondérées par l'énergie utilisée par chacun de ces éléments :

$$\lambda E = \lambda E_s \exp(-k IF - k_m IF_m) + \lambda E_c \{1 - \exp(-k IF)\} \quad (6)$$

Cette expression considère un sol nu surmonté d'une strate de feuilles mortes d'indice foliaire IF_m et de coefficient d'extinction k_m elle-même surmontée d'une strate de feuilles vivantes d'indice foliaire IF de coefficient d'extinction k . L'hypothèse est faite que la totalité de l'énergie interceptée par les feuilles mortes : $Rn\{\exp(-k IF) - \exp(-k IF - k_m IF_m)\}$ est dissipée sous forme de chaleur sensible.

LE SOUS-MODÈLE DE BILAN HYDRIQUE DU SOL

Chaque jour, la variation de la réserve hydrique du sol ΔR est calculée suivant :

$$\Delta R = P - r - \lambda E - Dr \quad (7)$$

où P est la précipitation journalière, λE l'évapotranspiration journalière en mm, Dr le drainage à la base de la couche de sol considérée. Durant les quatre premiers mois du cycle (lorsque la végétation n'est pas couvrante), le ruissellement r est calculé suivant la formulation déduite des résultats de (DE JONG, 1983). Il est négligé le reste du temps. Le drainage est supposé avoir lieu lorsque la réserve en eau de la couche de sol considérée dépasse sa réserve à la capacité au champ.

RÉSULTATS

SIMULATION DE LA PHÉNOLOGIE DU COUVERT VÉGÉTAL

Les efficacités du modèle de Monteith ayant été mesurées en 1993, les données de 1991 et 1992 sont utilisées pour tester le modèle. Les variations saisonnières de la biomasse (parties vivantes) et de la phytomasse (parties vivantes plus parties mortes) herbacées épiquées sont correctement simulées par le modèle (figure 2).

L'effet sur la phénologie du couvert végétal de l'existence de périodes sèches en fin de cycle (en 1991 et 1992) ou en milieu de cycle (en 1992) est bien rendu par le modèle. Une sous-estimation des biomasses et nécromasses est cependant apparente pour la deuxième moitié du cycle en 1992. Ceci pourrait être dû à la surestimation par le modèle de l'intensité de la période sèche à cette période (voir paragraphe simulation de la réserve en eau du sol). La production primaire nette épiquée calculée d'après les observations est de 1 270 et 1 117 g m⁻² en 1991 et 1992 respectivement, contre une production simulée de 1 489 g m⁻² (+17,2 %) et 1 178 g m⁻² (+5,5 %) respectivement.

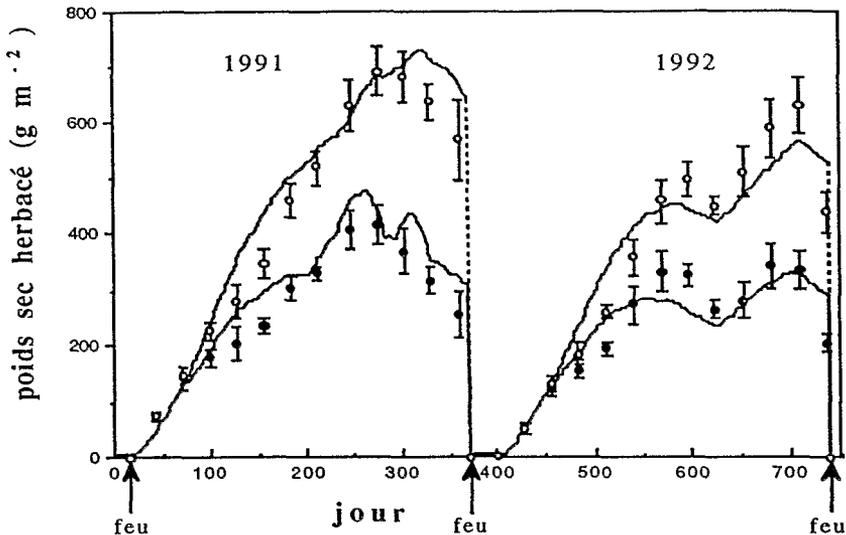


Figure 2 :

Comparaison de l'évolution de la biomasse herbacée observée (●) et simulée (—) et de la phytomasse herbacée observée (○) et simulée (---) en 1991 et 1992. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standard.

SIMULATION DE LA RÉSERVE EN EAU DU SOL

Le modèle simule les variations de stock en eau du sol de façon satisfaisante (figure 3).

Les principales divergences entre les réserves en eau observée et simulée existent après les premières pluies en 1992 et durant la période sèche de milieu de cycle cette même année. Dans le premier cas, une sous-estimation du ruissellement, sans doute maximum en début de cycle lorsque le couvert végétal est très peu développé, ou de l'évaporation du sol peut expliquer cette différence. Dans le deuxième cas, la trop forte décroissance de la teneur en eau du sol en période de fort stress hydrique s'explique par le fait qu'à cette date, la fraction d'eau extraite par les plantes en dessous de l'horizon 0-60 cm devient non négligeable (LE ROUX *et al.*, 1995). Une prochaine version du modèle devra tenir compte de ce deuxième réservoir d'eau du sol utilisé par les plantes en saison sèche.

SIMULATION D'UN BILAN HYDRIQUE À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

La figure 4 présente le bilan hydrique simulé pour l'une des trois années d'étude à Lamto (1992).

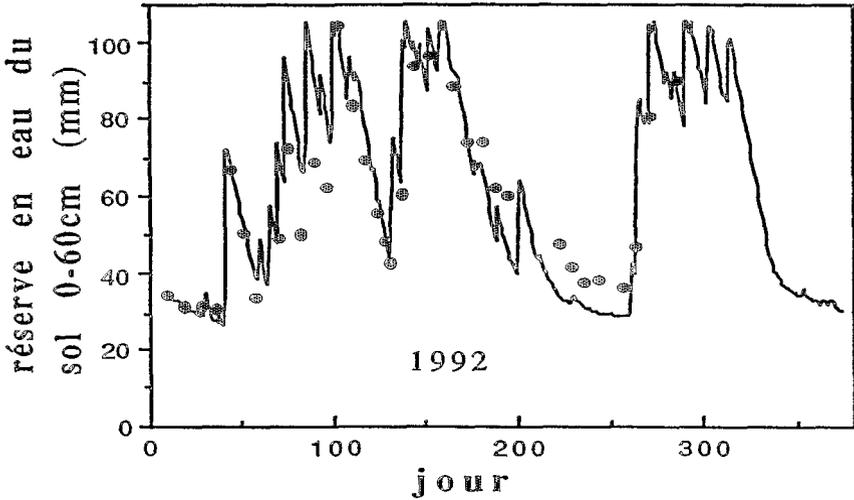


Figure 3 :
 Comparaison de l'évolution de la teneur en eau du sol (0-60 cm) observée (—) et simulée (⊙) en 1992.

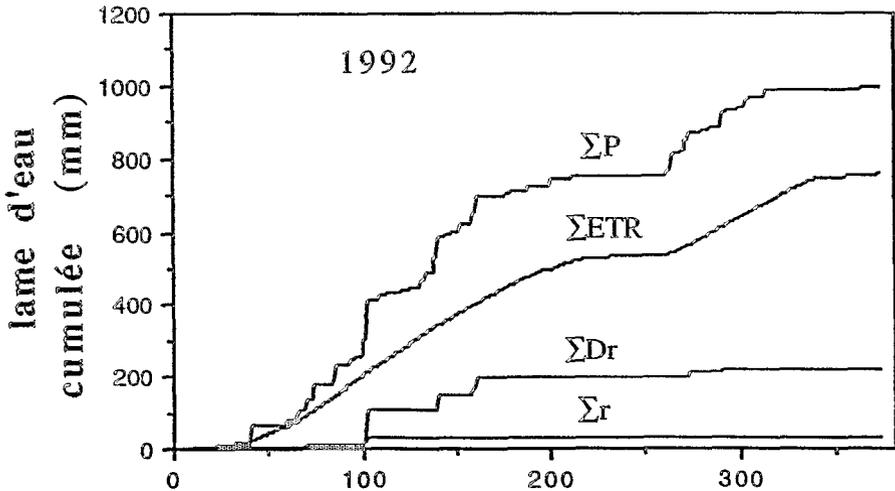


Figure 4 :
 Bilan hydrique simulé pour l'année 1992. Les quantités cumulées de précipitation (ΣP), évapotranspiration (ΣETR), drainage (ΣDr) et ruissellement (Σr) sont présentées.

Le tableau 1 résume les principaux résultats obtenus pour les trois années.

Tableau 1

Valeurs des termes du bilan hydrique annuel pour les trois années d'étude. La différence entre P et (ETR+r+Dr) en 1992 et 1993 est due à une légère variation nette du stock en eau du sol

	1991	1992	1993
Précipitation	1178	991	958
ETR	896 (76,1 %)	753 (76,0 %)	779 (81,3 %)
dont :			
Esol	124 (13,8 % ETR)	158 (21,0 % ETR)	156 (20,1 % ETR)
Eplantes	772 (86,2 % ETR)	595 (79,0 % ETR)	623 (79,9 % ETR)
Ruissellement	27 (2,3 %)	24 (2,4 %)	2 (0,2 %)
Drainage à 0,6 m	255 (21,6 %)	217 (21,9 %)	184 (19,2 %)

Les remarques suivantes peuvent être faites :

- le ruissellement est extrêmement faible dans ce type de milieu (0 à 2,5 %). Ce résultat provient des observations faites à Lamto (DE JONG, 1983) et est soutenu par les résultats obtenus sur un bassin versant de la zone guinéenne près de Lamto (LAFFORGUE, 1982). Ce dernier auteur souligne que le ruissellement est négligeable dans les zones de sol ferrugineux. À l'échelle d'un bassin versant, l'essentiel du ruissellement provient des zones de bas de versant à sol hydromorphe. Par ailleurs, des valeurs annuelles de ruissellement de 0,8 à 5,5 % ont été obtenues pour un bassin versant en zone de savane arbustive soudanienne (ROOSE, 1980) ;
- bien que seuls les 60 premiers centimètres de sol soient considérés dans cette version du modèle, le drainage sous cet horizon ne représente que de l'ordre de 20 % des précipitations annuelles ;
- l'évapotranspiration annuelle correspond à environ 80 % de la précipitation annuelle. Ce chiffre est sans doute un peu sous-estimé, cette version du modèle ne prenant pas en compte l'extraction d'eau sous le plan 60 cm, alors que celle-ci représente de l'ordre de 10 % de l'évapotranspiration en saison humide, et jusqu'à 55 % en période de stress hydrique intense (LE ROUX *et al.*, 1995). Les prochaines versions du modèle devront tenir compte de cette extraction racinaire supplémentaire.

DISCUSSION ET PERSPECTIVES : UTILISATION DU MODÈLE POUR L'ÉTUDE DE L'IMPACT DU FONCTIONNEMENT DES SAVANES GUINÉENNES SUR LE BILAN HYDROLOGIQUE

Le modèle présenté permet d'étudier le bilan hydrologique à l'échelle de la parcelle, mais surtout d'analyser les interactions existantes entre le bilan hydrologique et la dynamique du couvert végétal. L'évapotranspiration est en effet un terme essentiel du bilan hydrologique des surfaces couvertes par une végétation naturelle en Afrique de l'ouest. Ce processus transfère vers l'atmosphère de l'ordre de 60 à 100 % de l'eau précipitée annuellement (figure 5).

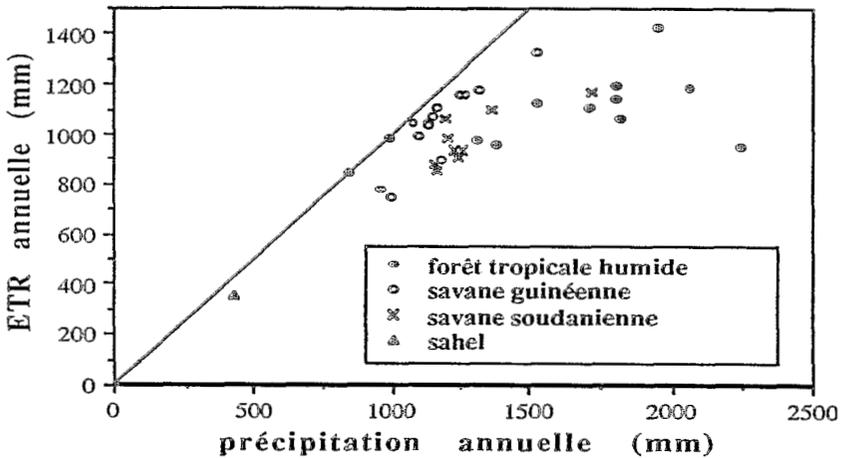


Figure 5 :

Relation entre l'évapotranspiration ETR annuelle et la précipitation annuelle pour les quatre grands types de couvert végétal naturel en Afrique de l'ouest.

*forêt tropicale d'après BOIS et ROOSE (1978), HUTTEL (1975), MONTENY (1987) et MONTENY et CASENAVE (1989) ;

*savane guinéenne d'après LAFFORGUE (1982), CHEVALLIER et al. (1990) et cette étude ;

*savane soudanienne d'après ROOSE (1980) ;

*savane sahélienne d'après Monteny et Lhomme (com. pers.).

Cette figure montre que les savanes d'Afrique de l'ouest, si elles ne sont pas mises en culture, recyclent tout aussi activement l'eau précipitée vers l'atmosphère que les forêts tropicales humides. LE ROUX et MORDELET (1995) ont par ailleurs montré que les capacités photosynthétiques de la strate herbacée en savane guinéenne sont aussi fortes que celles observées pour des forêts tropicales humides. Les implications climatiques des changements de mode d'utilisation des terres en zone guinéenne ne doivent donc pas être posées simplement en terme de déforestation, mais plutôt de mise en culture des surfaces naturelles : la mise

en culture de zones de savane guinéenne ou de zones forestières est en effet susceptible d'entraîner une modification comparable du taux annuel d'évapotranspiration.

Toute étude de l'impact du changement de mode d'utilisation des terres sur le bilan hydrologique doit donc inclure explicitement le rôle dynamique de la végétation, en terme phénologique. Dans ce cadre, les prochaines versions du modèle seront utilisées pour simuler le bilan hydrologique du bassin versant de Sakassou, situé à 40 km de notre site d'étude en zone de savane guinéenne. Ce bassin a été étudié par l'Orstom durant 6 ans (LAFFORGUE, 1982). L'objectif sera de tester la validité des simulations à cette échelle, mais surtout de comprendre et de quantifier l'impact du fonctionnement des savanes guinéennes sur le bilan hydrologique. Dans l'attente de ce travail, le tableau 2 compare les bilans simulés à Lamto pour 3 ans et observés à Sakassou pour 6 ans.

Tableau 2

Valeurs des précipitations et évapotranspirations annuelles déduites (1) des observations de précipitation et écoulement faites à Sakassou par l'Orstom (LAFFORGUE, 1982) durant la période 1972-1977, et (2) des simulations effectuées pour le site d'étude à Lamto pour la période 1991-1993 (cette étude). Les variations de stock en eau sont négligeables, les relevés annuels étant faits de fin de saison sèche à fin de saison sèche et les réservoirs souterrains étant de très faible capacité pour ce bassin (LAFFORGUE, 1982)

Site :	Précipitation en mm	ETR en mm	Écoulement en mm
Sakassou (1972-77)	1134	1046 (de 92,2 %)	88 (7,8 %)
année humide	1319	1175 (89 %)	144 (11 %)
année sèche	840	840 (100 %)	0 (0 %)
Lamto (1991-93)	1042 (de 960 à 1180)	810 (de 76 à 81 %)	-

Il faut rappeler ici que l'évapotranspiration annuelle est sous-estimée de l'ordre de 20 % dans la version actuelle du modèle où seule la couche de sol 0-60 cm est considérée. Les deux résultats montrent cependant l'extrême importance du terme évapotranspiration, et donc du contrôle biologique qui lui est associé, dans le bilan hydrologique de ce type de surface.

CONCLUSION

Un modèle de production primaire/phénologie a été couplé à un modèle de bilan hydrique pour simuler l'impact du fonctionnement des savanes guinéennes sur le bilan hydrologique de ce type de surface. Ce modèle, établi pour une surface relativement homogène, est bien entendu insuffisant pour simuler de façon réaliste le bilan hydrologique à l'échelle d'un bassin versant. À cette échelle, les problèmes d'hétérogénéité du milieu apparaissent. La variabilité spatiale des types de végétation et de la teneur en eau du sol (HILLS et REYNOLDS, 1969) doit ainsi être prise en compte. La topographie d'un bassin versant est également souvent un élément majeur déterminant ses caractéristiques hydrologiques et notamment les ruissellements de surface ou subsurface (BEVEN *et al.*, 1988). Comme le rappelle BONELL *et al.* (1993), « The problem of using small-scale field measurements and associated equations depicting small-scale physics of homogeneous systems, and scaling-up such sub-grid processes to heterogeneous, model grid scale still presents a major challenge ».

Le modèle présenté n'a donc pas pour but de remplacer les approches nécessaires d'établissement et de simulation du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant voire de la région. Cependant, ce modèle, original dans sa conception, permet d'établir un lien explicite entre le bilan hydrologique et la dynamique de la végétation de surfaces continentales. Il permet d'une part de tester la réaction de la végétation à des changements de conditions environnementales (régime pluviométrique extrême par exemple) et d'autre part d'étudier l'impact du fonctionnement dynamique de cette végétation sur un terme très important du bilan hydrologique : l'évapotranspiration. Cet effet est jusqu'ici négligé dans les modèles fonctionnant à des échelles plus larges (modèles de bassin versant ou modèles de climat). La phénologie très marquée des savanes d'Afrique de l'ouest soumises au feu n'est ainsi pas prise en compte dans les modèles de circulation générale (LE ROUX X. *et al.*, 1994). L'approche proposée ici pourrait être adaptée pour servir dans des modèles fonctionnant à une échelle plus large, ce qui renforcerait sans doute les capacités prédictives de tels modèles.

BIBLIOGRAPHIE

- ABBOTT M., BATHURST J., CUNGE J., O'CONNELL P., RASMUSSEN J., 1986. An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, « SHE », 2 : structure of a physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.* 87 61-77.
- BEVEN K., WOOD E., SIVAPALAN M., 1988. On hydrological heterogeneity. Catchment morphology and catchment response. *J. Hydrol.* 100 353-375.
- BOIS J.F., ROOSE E., 1978. Réflexions sur les résultats de mesures systématiques d'humidité à la sonde à neutrons dans un sol ferrallitique de basse Côte d'Ivoire. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.* XV (4), 351-363.
- BONELL M., BALEK J., 1993. Recent scientific developments and research needs in hydrological processes of the humid tropics. In : « Hydrology and water management in the humid tropics. Hydrological research issues and strategies for water management ». (Eds Bonell M., Hufschmidt M. et Gladwell J.) Unesco, Cambridge University Press.
- CHEVALLIER P., PLANCHON O., LAPETITE J.M., 1990. Le fonctionnement hydrologique du bassin versant. In « Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide ». (Éd Orstom). Équipe Hyperbav, 207-223.
- DE JONG K., 1983. Research on the water balance in a savannah ecosystem. A study for two soil types at Lamto, Ivory Coast. Rapport interne, 73p.
- DICKINSON R., HENDERSON-SELLERS A., KENNEDY P., WILSON M., 1986. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. NCAR technical note Boulder, Colorado, 69p.
- DUCOUDRÉ N., LAVAL K., PERRIER A., 1993. Sechiba, a new set of parametrizations of the hydrologic exchanges at the land/atmosphere interface within the LMD atmospheric general circulation model. *J. Clim.* 6 (2), 248-273.

- HILLS R., REYNOLDS S., 1969. Illustrations of soil moisture variability in selected areas and plots of different sizes. *J. Hydrol.* 8 27-47.
- HOLDRIDGE L., 1947. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science* 105 367-368.
- HUTTEL C., 1975. Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de basse Côte-d'Ivoire. IV. Estimation du bilan hydrique. *Terre et Vie* 29 192-202.
- LAFFORGUE A., 1982. Étude hydrologique des bassins versants de Sakassou (Côte d'Ivoire, 1972-1977). Travaux et documents de l'Orstom 149 342p.
- LE ROUX X., POLCHER J., DEDIEU G., MENAUT J.C., MONTENY B., 1994. Radiation exchanges above West African moist savannas : seasonal patterns and comparison with a GCM simulation. *J. Geophys. Res.* 99 (D12) 25857-25868.
- LE ROUX X., 1995. Étude et modélisation des échanges sol - plantes - atmosphère dans une savane humide (Lamto, Côte d'Ivoire). Thèse, Univ. Paris 6, 200 p.
- LE ROUX X., MORDELET P., 1995. Leaf and canopy CO₂ assimilation in a West African humid savanna during the early growing season. *J. Trop. Ecol.* 11 (sous presse).
- LE ROUX X., BARIAC T., MARIOTTI A., 1995. Assessment of space partitioning for soil water resource between shrub and grass components in a West African humid savanna. soumis à *Ecologia*.
- MINTZ Y., 1984. The sensitivity of numerically simulated climates to land-surface boundary conditions. In « The global climate ». (Eds J.T. Houghton) Cambridge University Press, 79-106.
- MONTEITH J., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 2 747-766.
- MONTEITH J. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 281 277-294.

- MONTENY B.A., 1987. Contribution à l'étude des interactions végétation-atmosphère en milieu tropical humide. Importance du rôle du système forestier dans le recyclage des eaux de pluies. Thèse, Univ. Paris 11, 170 p.
- MONTENY B.A., CASENAVE A., 1989. The forest contribution to the hydrological budget in tropical West Africa. *Ann. Geophys.* 7 (4), 427-439.
- PAGNEY P., 1988. Le climat de Lamto (Côte d'Ivoire). In « Le climat de la savane de Lamto (RCI) et sa place dans les climats de l'Ouest africain ». (Éds M. Lamotte, J.L. Tireford) Trav. cherch. Lamto, 31-79.
- PERRIER A., 1973. Bilan hydrique de l'assolement blé-jachère et évaporation d'un sol nu, en région semi-aride. In « Réponse des plantes aux facteurs climatiques » Actes Coll. Uppsala 1970, Unesco, 477-487.
- ROOSE E., 1980. Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonaire issu de granite sous culture et sous savane arbustive soudanienne du nord de la Côte d'Ivoire. Korhogo : 1967-1975. Mémoire Orstom, Adiopodoumé, Côte d'Ivoire 172p.
- SELLERS P., MINTZ Y., SUD Y. et DALCHER A., 1986. A simple biosphere (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.* 43 (6), 505-531.
- SHUKLA J. et MINTZ Y., 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate. *Science* 215 1498-1501.
- TUZET A., PERRIER A., MASAAD C., 1992. Crop water budget estimation of irrigation requirement. *ICID bul.* 41 (2), 1-17.
- WIGMOSTA M., VAIL L. et LETTENMAIER D., 1994. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resour. Res.* 30 1665-1679.