

CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION DES ÉCHANGES DE MASSE ET D'ÉNERGIE AU NIVEAU DES COUVERTS ÉPARS*

A. TUZET¹, J-F. CASTELL¹, A. PERRIER¹, O. ZURFLUH¹

RÉSUMÉ

La prise en compte de l'hétérogénéité des surfaces continentales par les modèles climatiques est encore imparfaite. Pour obtenir des éléments permettant d'améliorer ce point, une étude a été menée dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel. Il s'agissait de caractériser puis de modéliser les échanges de masse et d'énergie au niveau d'un couvert hétérogène particulier, constitué d'une strate arbustive éparse et d'une strate herbacée plus ou moins continue. Les mesures révèlent que la strate arbustive joue un important rôle d'écran, à la fois radiatif et convectif, et que sa structure éparse entraîne une grande hétérogénéité spatiale des flux. Par ailleurs, les contributions de chacune des deux strates au flux total de chaleur latente sont très inégales. Une première analyse agrométéorologique a permis d'analyser de façon simple l'impact de la strate arbustive sur la demande climatique au niveau de la strate herbacée, et d'en proposer une application possible pour l'agroforesterie. Cette approche n'est cependant valable que si la végétation arbustive est relativement dense et homogène. Une modélisation plus fine, basée sur une approche mono-dimensionnelle est également proposée. Elle prend mieux en compte les faibles densités et peut même décrire une certaine variabilité spatiale des transferts de quantité de mouvement. Ce modèle de transferts de masse, d'énergie et de quantité de mouvement, traduit bien la contribution de chaque strate aux flux moyens, et peut être un outil intéressant pour les modèles climatiques.

¹Bioclimatologie Inra-INA-PG, F-78850 Thiverval-Grignon tel. 30 81 55 47 - fax. 30 81 55 63.

*Texte paru dans *Les dossiers de l'environnement* n°8, 1994 : « Écosystèmes et changements globaux », actes du colloque « Écosystèmes naturels et cultivés & changements globaux », organisé conjointement par la délégation permanente de l'Inra et le CNRS-PIR Environnement. Dourdan, 17-19 mai 1994. Repris avec l'aimable autorisation de la revue.

INTRODUCTION

Le problème de la compréhension, puis de la modélisation et de la paramétrisation du bilan hydrique à l'échelle climatique en termes plus précis que ceux d'un simple bilan hydrologique, est posé à la communauté scientifique toute entière depuis l'émergence et le développement de modèles de circulation générale (programme Gewex). Il s'agit d'améliorer la paramétrisation des processus d'hydrologie de surface et d'analyser les effets intégrés des perturbations de la surface sur les échanges à grande échelle. De tels objectifs ont conduit à toute une série d'expériences menées dans différentes conditions de climats, de sols et de végétations : Hapex-Mobilhy (ANDRÉ *et al.*, 1988), Fife (SELLERS *et al.*, 1992), Efeda (BOLLE *et al.*, 1993), Hapex-Sahel (GOUTORBE *et al.*, 1994).

Dans chacune des mailles des modèles de circulation générale, toutes les surfaces à prendre en compte sont relativement loin des caractéristiques d'homogénéité classiques des couverts denses et relativement homogènes horizontalement. En effet, une part importante de la surface du globe est caractérisée par une couverture végétale partielle ou éparse. Ces surfaces correspondent aux régions agricoles en début de période végétative et à un état de surface naturel ou agricole dans toutes les régions arides et semi-arides.

Ainsi, pour affiner les modèles climatiques en tenant compte de l'hétérogénéité de la surface continentale, il est nécessaire de caractériser les échanges de masse et d'énergie au niveau de ces types de surfaces, c'est-à-dire au niveau de couverts dans lesquels coexistent de façon simultanée deux strates de végétation : une strate supérieure éparse et une strate inférieure plus ou moins continue.

Dans ces couverts, la répartition des sources et des puits relative à chaque flux (quantité de mouvement, chaleur et vapeur d'eau) est différente selon la quantité transférée (GARRATT, 1978). Cette répartition est imposée par la structure même du couvert. Les éléments épars de la strate supérieure (arbres ou arbustes) constituent les principaux puits de quantité de mouvement et leur présence conditionne fortement les profils de vent, aussi bien à l'échelle locale que régionale. De plus, dans les zones arides, ils peuvent constituer une source importante de vapeur d'eau, surtout en période sèche, quand la faible disponibilité de l'eau en surface réduit considérablement la contribution de la strate herbacée à l'évaporation totale du système.

Notre objectif est donc d'étudier les mécanismes qui gèrent le fonctionnement des échanges au sein de tels couverts afin d'en établir leur généralité. Nous chercherons à analyser et à modéliser les interactions d'ordre microclimatique entre les deux strates en focalisant plus particulièrement notre attention sur les échanges convectifs et le fonctionnement hydrique d'un tel système. Cette approche passe donc par une phase expérimentale, nécessaire à l'acquisition des données de base, puis par une étude théorique, à travers le développement d'un modèle mécaniste de simulation des échanges.

EXPÉRIENCE HAPEX-SAHEL

Dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel, le type de végétation que nous avons étudié est une savane arbustive (association arbustes-herbe). Ce couvert épars d'arbustes permet le développement d'une strate herbacée plus ou moins continue, exploitée par le passage des animaux.

Une caractérisation précise de la végétation (cartographie, indice foliaire, hauteur, diamètre de la couronne, nombre et diamètre des brins de chaque buisson) a été réalisée sur un carré de cinquante mètres de côté (figure 1). Sur ce carré, la surface projetée au sol de la couronne des arbustes représente environ 18 % de la surface totale.

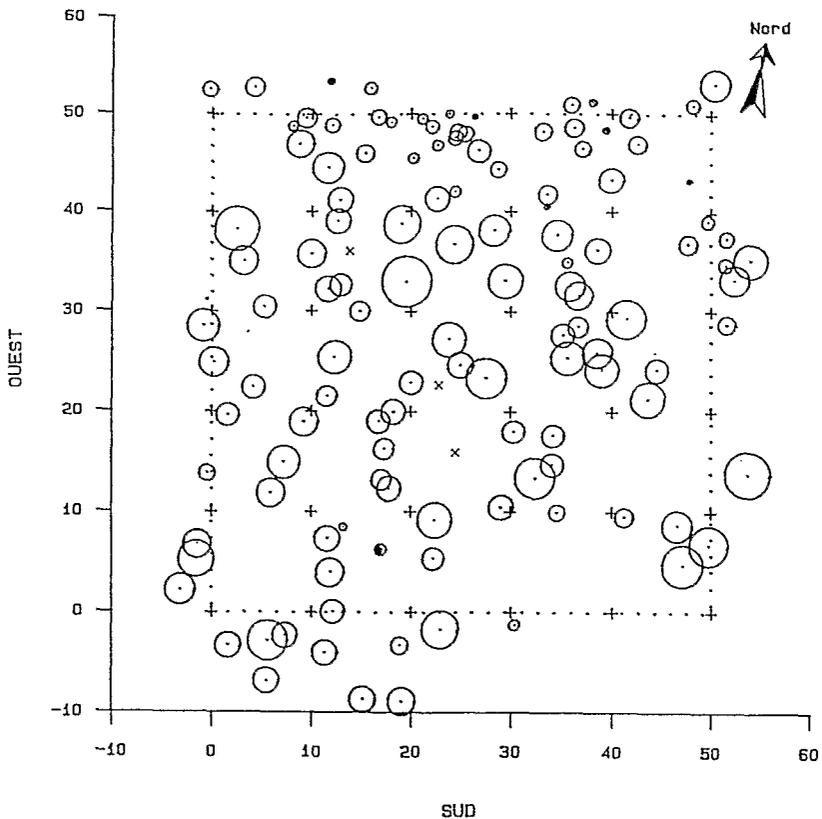


Figure 1 :

Cartographie de la végétation de la zone d'étude. Les cercles représentent les surfaces des couronnes des arbustes projetées au niveau du sol ; les distances sont exprimées en mètres.

La strate arbustive n'est pratiquement représentée que par une seule espèce (*Guiera senegalensis*), et la répartition spatiale des buissons peut être considérée comme totalement aléatoire. Cependant, compte tenu de la gestion des terres et de leur mise en jachère, les buissons de *Guiera* correspondent à peu près à une seule tranche d'âge conduisant ainsi à une hauteur moyenne assez homogène (2 à 3 mètres). Par contre, on observe en fonction de leur exploitation un nombre de rejets très variable d'un buisson à l'autre, chaque brin représentant un âge et donc un diamètre différent. Cette disparité au niveau des brins accentue naturellement la variabilité des volumes occupés par les buissons.

Une bonne description de la structure de la végétation est essentielle pour caractériser le rôle d'écran des arbustes vis-à-vis des rayonnements et du vent. Elle est en effet nécessaire pour analyser les phénomènes d'atténuation du rayonnement dans le couvert et pour interpréter les effets de sillage et d'absorption de quantité de mouvement liés à la présence des arbustes.

En effet, l'hétérogénéité spatiale de la végétation entraîne une interception non uniforme du rayonnement. Ceci explique la forte variabilité des valeurs de rayonnement global et de flux de conduction de chaleur dans le sol, mesurés en différents points de la surface du sol (figure 2). La figure 2a décrit les atténuations du rayonnement global mesurées en zone d'ombre portée et le déplacement de ces zones en fonction du point considéré et de la course du soleil au cours d'une journée. Au niveau des ombres portées, le rayonnement global est d'environ la moitié du rayonnement global incident, ce qui est conforme à la transmission moyenne des arbustes compte tenu de leur indice foliaire moyen (de l'ordre de 1,2). Par ailleurs, ces résultats expérimentaux montrent également que le rayonnement global arrivant au sol, même en plein soleil, demeure toujours inférieur (d'environ 15 %) au rayonnement global incident mesuré au-dessus de la savane. Cette diminution au niveau du sol est sans doute liée à l'obstruction d'une partie du rayonnement diffus incident par les arbustes et ceci malgré une certaine rediffusion du rayonnement par les feuilles des arbustes.

La figure 2b illustre, pour la même journée, les conséquences de cette variabilité de l'énergie radiative reçue par la surface du sol sur les flux de conduction de chaleur dans le sol. Ces mesures confirment la grande variabilité des flux conductifs, qui peuvent varier du simple au triple au cours de la partie diurne, suivant que le point de mesure se trouve à l'ombre ou exposé au rayonnement solaire direct. On notera en particulier le contraste en début de journée entre les courbes 2, 3, 4 et 5, qui correspondent à des zones ombrées et les courbes 1 et 6, relatives à des zones ensoleillées. L'après-midi, ce contraste est moins net, du fait de l'inertie thermique du sol. En période nocturne, les flux de chaleur dans le sol mesurés sous les arbustes présentent une réduction d'environ 30 % par rapport à ceux mesurés en zone plus ouverte, du fait de la réduction des pertes radiatives sous couvert.

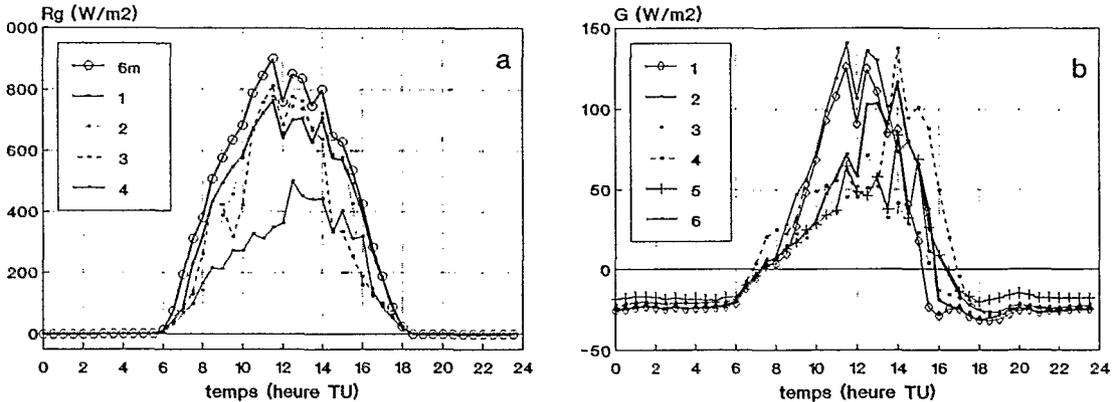


Figure 2 :

Effets de l'hétérogénéité spatiale de la strate arbustive : a) sur le rayonnement global (R_g), mesuré au cours d'une journée en 4 points (1, 2, 3, 4) sous le couvert, comparé aux valeurs mesurées au-dessus de la végétation (6 mètres) ; b) sur les flux de conduction de chaleur dans le sol (G) mesurés en 6 points (1, 2, 3, 4, 5, 6) sous le couvert au cours de la même journée.

Les caractéristiques de la masse d'air (température, humidité, vent) ont été mesurées à la fois au-dessus et à l'intérieur du couvert végétal. Ces mesures à deux niveaux nous permettent d'une part, d'avoir la référence de type régional au-dessus de la végétation et d'autre part, d'avoir une caractérisation du microclimat au sein du couvert (figure 3). Les arbustes, qui constituent des puits de quantité de mouvement, perturbent le champ de vent à l'intérieur du couvert, modifiant ainsi les échanges de chaleur et de vapeur au niveau de la strate herbacée. Il en résulte donc une modification des caractéristiques de l'air (température et humidité) au-dessus de cette strate.

Les flux turbulents de chaleur sensible et latente ont été mesurés au-dessus de la végétation et à la surface du couvert herbacé par la méthode des fluctuations turbulentes. La participation de la strate arbustive au flux total de chaleur latente a été mesurée de façon continue à partir de mesures de débit de sève (STEINBERG *et al.*, 1989). Pour obtenir une bonne représentation de cette transpiration, les capteurs ont été installés sur des brins choisis en fonction de leur exposition vis-à-vis du rayonnement solaire. Les résultats obtenus par ces mesures indépendantes les unes des autres sont représentés sur la figure 4. La somme des

contributions au flux global de chaleur latente des deux composantes (arbustive et herbacée) est présentée sur la figure 4a. L'accord plutôt satisfaisant entre cette courbe et celle représentant le flux total mesuré au-dessus de la végétation montre la bonne cohérence de nos mesures de flux turbulents. Sur cette figure, on note également la faible participation de la strate arbustive au flux total de chaleur latente (environ 60 W.m^{-2} en milieu de journée). Ce résultat se confirme sur l'ensemble de la période de mesure et est corroboré par les fortes valeurs de résistance stomatique mesurées sur les feuilles de *Guiera* (environ 400 s.m^{-1} en milieu de journée). La participation de la strate arbustive au flux total de chaleur latente semble plus dépendante de la demande climatique que de la disponibilité de l'eau dans les couches superficielles du sol. Par contre, cette dernière conditionne fortement l'évapotranspiration de la strate herbacée.

Un exemple d'évolution journalière des principaux termes du bilan d'énergie de la végétation est présenté sur la figure 4b. On remarque que la somme des flux convectifs (H et LE) et conductif (G) est légèrement inférieure au rayonnement net (Rn) mesuré. Ceci peut s'expliquer par une sous-estimation du flux conductif G, liée à la fois à la méthode d'estimation du flux moyen et au positionnement des capteurs. En effet, en les plaçant juste sous la surface du sol (pour éviter une sous-estimation du flux due à la chaleur accumulée entre la surface et le fluxmètre), nous avons provoqué un dessèchement et donc un suréchauffement de la couche superficielle au-dessus du capteur. Ceci a accentué le flux de chaleur sensible et le flux radiatif, et conduit à une sous-estimation par le capteur du véritable flux de chaleur dans le sol.

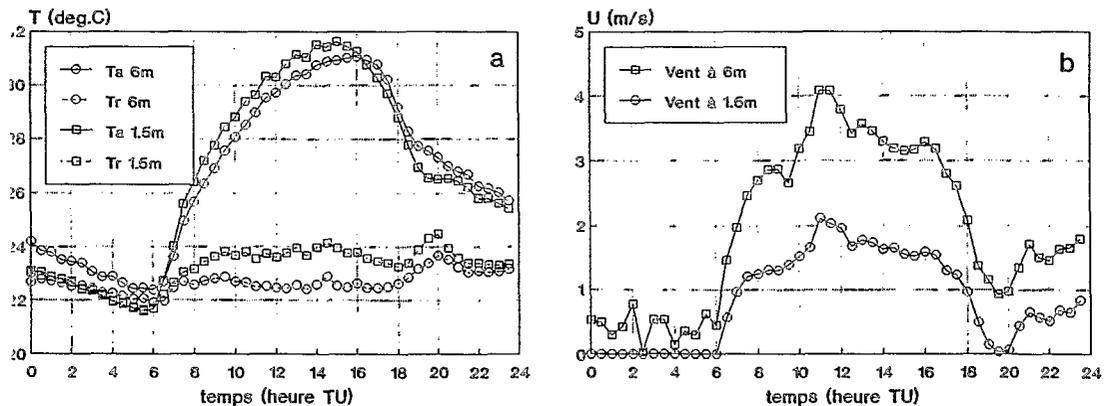


Figure 3 :

Caractérisation du microclimat du couvert : a) suivi horaire de la température de l'aire (ta) et de la température de rosée de l'air (Tr) au-dessus (6 m) et à l'intérieur (1,5 m) de la strate arbustive ; b) vitesse du vent (U) mesurée au-dessus (6 m) et à l'intérieur (1,5 m) de la strate arbustive au cours de la même journée.

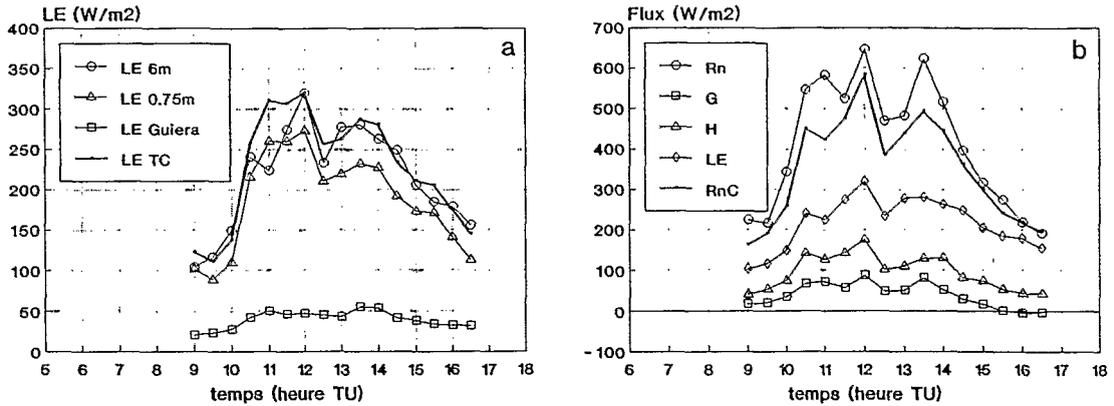


Figure 4 :

Flux turbulents de chaleur latente et sensible et bilan d'énergie : a) contributions des strates herbacées (LE 0,75 m) et arbustives (LE Guiera) au flux total de chaleur latente mesuré au-dessus de la végétation (LE 6 m). Il existe un assez bon accord entre ce flux total mesuré et la somme des flux des deux strates (LE TC = LE 0,75 m + LE Guiera) ; b) suivi des différents termes du bilan d'énergie de la végétation au cours de la même journée : H, LE et Rn sont respectivement le flux de chaleur sensible, le flux de chaleur latente et le rayonnement net mesurés au-dessus de la végétation, G est le flux de conduction de chaleur dans le sol, calculé à partir des mesures de 7 fluxmètres.

APPROCHE AGROMÉTÉOROLOGIQUE

Pour une gestion optimale de la savane pâturée (en fonction des besoins de pâture et de bois), il faut une bonne compréhension du rôle que joue la structure de la strate arbustive à la fois sur les échanges du couvert herbacé et sur son fonctionnement propre. Du point de vue agrométéorologique, il est donc important d'analyser l'influence de la strate arbustive sur la répartition des énergies radiatives et sur celle des énergies mécaniques dans le couvert et d'en déduire les conséquences sur la réduction de la demande climatique au niveau de la strate herbacée. Ainsi pourra-t-on définir la structure de la strate arbustive qui permettra le meilleur compromis entre le bilan hydrique et la production de la strate herbacée.

En première approximation, au niveau de couverts épars, on peut assimiler le profil de vent moyen à un double profil logarithmique qui, en coordonnées logarithmiques, se traduit par un double profil linéaire avec une intersection au voisinage du sommet de la strate arbustive (figure 5a). Par rapport à une zone ouverte ne comprenant qu'une seule strate herbacée, les arbustes, qui créent une rugosité régionale, influencent les transferts verticaux de quantité de mouvement et accentuent la décroissance de la vitesse du vent au-dessus du couvert arbustif.

De plus, ce même système arbustif réduit la décroissance du vent à l'intérieur du couvert, conduisant ainsi à une diminution du coefficient d'échange de surface (TUZET *et al.*, 1993).

Dans le cas simple d'une répartition horizontale de la surface foliaire des arbustes suffisamment homogène, on peut réduire la caractérisation de la structure du couvert arbustif au profil de densité de surface foliaire. Dans ce cas, la pénétration du rayonnement dans le couvert peut être assimilée à une atténuation de type exponentielle, fonction des surfaces foliaires cumulées, et les caractéristiques aérodynamiques du couvert (rugosité et hauteur de déplacement) peuvent être déterminées simplement à partir du profil de densité de surface foliaire (PERRIER, 1976 ; SHAW et PEREIRA, 1982).

Dans ces conditions, la double atténuation de l'énergie radiative et du coefficient d'échange à l'intérieur de la strate arbustive réduit la valeur de la demande climatique EP au sein du couvert, surtout pour la strate herbacée, au voisinage de la surface du sol. La demande climatique EP est la somme de deux termes, un terme radiatif T_{rad} et un terme convectif T_{conv} :

$$EP = P' / (P' + \gamma) (T_{rad} + T_{conv})$$

$$\text{avec} \quad T_{rad} = Rn - G \quad \text{et} \quad T_{conv} = \rho c_p h(u) (Ta - Tr)$$

Dans cette expression :

- P' est la dérivée de la pression de vapeur saturante ;
- γ la constante psychrométrique ;
- Rn le rayonnement net de la surface ;
- G le flux de conduction de chaleur dans le sol ;
- ρc_p la chaleur massique de l'air ;
- Ta la température de l'air ;
- Tr la température de rosée de l'air et $h(u)$ le coefficient d'échange.

La figure 5b représente une simulation de la variation de EP , T_{rad} et T_{conv} en fonction de l'indice foliaire de la strate arbustive. L'augmentation de l'indice foliaire du couvert arbustif conduit à une diminution progressive du terme radiatif et du terme convectif. Le terme convectif qui en valeur absolue est le plus faible est celui qui subit la plus forte atténuation. Ces résultats traduisent le double effet radiatif et convectif d'une strate arbustive sur la demande climatique au niveau du couvert herbacé de surface. De cette réduction de EP , résulte une diminution de la consommation d'eau ET du couvert herbacé, calculée selon l'expression de Penman-Monteith :

$$ET = EP \cdot \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} h(u) r_s}$$

où r_s est la résistance stomatique du couvert herbacé. Sur cette figure, un exemple de réduction de ET en fonction de l'indice foliaire de la strate arbustive est représenté, pour une valeur de résistance stomatique du couvert herbacé égale à 100 s.m^{-1} .

Cette réduction de la consommation d'eau permet l'étalement de l'utilisation de l'eau disponible sur une plus longue période, facteur favorable surtout en conditions d'apports pluviométriques réduits et très intermittents. Cependant, l'effet radiatif de la strate arbustive ayant également pour conséquence la diminution de la ressource lumineuse pour la strate herbacée, il est nécessaire de trouver un compromis permettant d'optimiser la production d'herbe en fonction des ressources en eau disponibles.

Cette analyse simplifiée du microclimat d'une savane est suffisante si la répartition horizontale de la strate arbustive reste relativement dense et homogène. Pour des systèmes plus épars et pour mieux décrire les hétérogénéités horizontale et verticale, une modélisation plus complète est nécessaire.

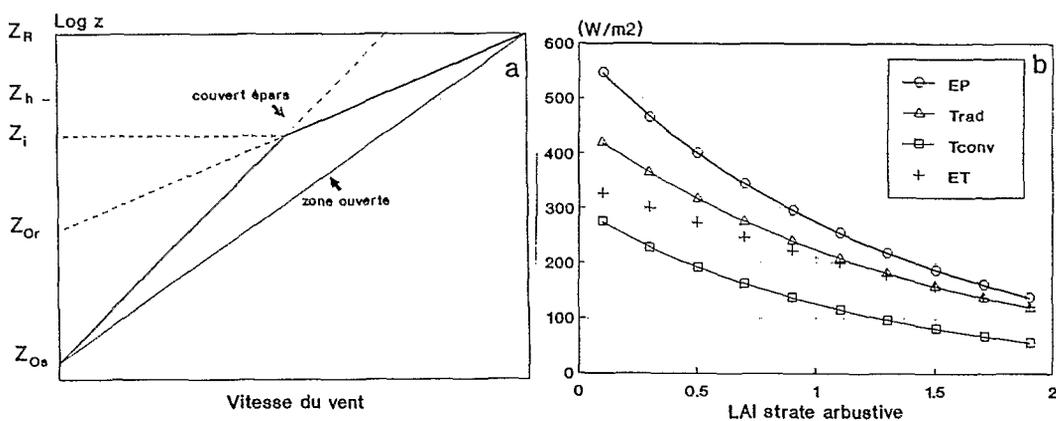


Figure 5 :

Modélisation simplifiée du rôle de la strate arbustive : a) sur le profil de vent moyen à l'intérieur et au-dessus de la végétation. Les différentes hauteurs (Z) sont portées sur une échelle logarithmique. z_r = hauteur du niveau de référence ; z_h = hauteur de la strate arbustive ; z_i = hauteur d'intersection des deux profils ; z_{os} = rugosité de la surface (qui ici est la même dans les deux cas) ; z_{or} = rugosité régionale ; b) sur la demande climatique (EP) et ses composantes (T_{rad} et T_{conv}) en fonction de l'indice foliaire (LAI) des arbustes. L'effet sur l'évapotranspiration (ET) de la strate herbacée a également été calculé sur la base d'une résistance stomatique de l'herbe de 100 s.m^{-1} .

MODÉLISATION DES TRANSFERTS AU NIVEAU DES COUVERTS ÉPARS

La modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau de couverts hétérogènes ou épars est un problème complexe. Jusqu'à présent, notre étude s'est limitée à une approche mono-dimensionnelle en considérant des moyennes spatiales. Celles-ci, effectuées sur un espace horizontal suffisamment grand, permettent d'éliminer les variations dues à l'hétérogénéité de la structure du couvert.

La schématisation excessive de ce modèle en limite bien entendu le réalisme, mais sa compréhension représente un premier pas nécessaire. D'ailleurs, ce modèle peut décrire de nombreuses situations naturelles, car à la surface de la Terre, bien des zones recouvertes d'une végétation éparse sont hétérogènes à l'échelle locale mais semblent plutôt homogènes à une échelle régionale.

Si l'on néglige les flux dispersifs liés à la procédure de moyenne spatiale, les équations d'évolution pour la vitesse moyenne du vent u , la température moyenne T et l'humidité spécifique q , s'écrivent sous les hypothèses d'homogénéité horizontale et d'une fermeture au 1^{er} ordre :

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial u}{\partial z} \right) - c_d a(z) u^2 \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{T_s - T}{r} \cdot a(z) \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial q}{\partial z} \right) + \frac{q_s - q}{r + r_s} \cdot a(z)\end{aligned}$$

où K est le coefficient de diffusivité turbulente, c_d le coefficient de trainée, $a(z)$ la densité de surface foliaire, T_s la température de surface, q_s l'humidité de surface, r la résistance de couche limite et r_s la résistance stomatique des éléments de végétation.

Sur la base d'arguments dimensionnels, la paramétrisation qui a été choisie pour le coefficient d'échange est celle proposée par PRANDTL (1925). Cette paramétrisation très simple nécessite l'introduction de la notion de longueur de mélange (échelle caractéristique proportionnelle à la taille des gros tourbillons). Dans notre cas, nous l'avons prise égale à la distance par rapport au sol, considérant que le profil de densité de surface foliaire n'intervenait, dans l'équation de conservation de quantité de mouvement qu'au niveau de la paramétrisation des forces de trainée ($c_d a(z) u^2$) imposées par les éléments de la végétation. Cette approche, relativement simple, donne des résultats intéressants. Le profil de vent simulé, représenté en coordonnées logarithmiques (figure 6a) montre bien les effets de puits de quantité de mouvement dûs aux deux strates de végétation.

Par ailleurs, si la partie supérieure du profil de vent est assimilée à un profil logarithmique, les valeurs obtenues pour la vitesse de frottement u_* et les hauteurs de déplacement d et de rugosité z_0 (normées respectivement par u_h , la vitesse de vent au sommet du couvert et h , la hauteur de la strate arbustive) ont pour valeurs :

$$\frac{u_*}{u_h} = 0,20 ,$$

$$\frac{d+z_0}{h} = 0,15 .$$

En utilisant la relation proposée par RAUPACH (1992) pour calculer le rapport u_*/u_h , on obtient une valeur égale à 0,18. Dans son étude, Raupach exprime le rapport u_*/u_h en fonction de la densité de rugosité, égale à la surface frontale des obstacles par unité de surface de sol. Cette approche, très différente de la nôtre, donne des résultats très voisins. D'autre part, à partir d'un modèle de transfert de quantité de mouvement en couvert homogène dans lequel la longueur de mélange est calculée à partir d'une intégration sphérique de la distance aux obstacles, PERRIER (1976) obtient une valeur de $(d+z_0)/h$ égale à 0,16. Cette comparaison conforte l'hypothèse selon laquelle la distance par rapport au sol est, pour un couvert de faible densité, le facteur déterminant pour l'estimation de la longueur de mélange. Par ailleurs, sur le profil de vent issu de notre modélisation, le rapport entre la vitesse du vent obtenue à une hauteur de 1,5 m (à l'intérieur du couvert arbustif) et celle du niveau de référence (hauteur 6 m) est voisin de 0,5 ; ce qui est conforme aux résultats expérimentaux, en conditions de neutralité thermique.

En fait, dans un système hétérogène (couvert épars), les absorptions de quantité de mouvement dépendent plus de la densité des arbustes (obstacles plus ou moins poreux, dans lesquels les feuilles sont regroupées) que d'une densité de surface foliaire homogène. Il est possible de traduire de telles conditions à partir de notre modélisation mono-dimensionnelle en introduisant des longueurs de mélange différentes en chaque point du profil. La longueur de mélange devient alors la distance la plus courte entre le point considéré et le sol ou l'arbuste (simplification de l'approche par intégration spatiale).

À partir de ces hypothèses, nous avons représenté sur la figure 6b les profils de vent obtenus à différentes distances d'un arbre. Pour paramétrer les forces de trainée, le regroupement des feuilles autour des obstacles a été pris en compte en calculant un nouveau profil de densité de surface foliaire pour chacune des distances à l'arbre. Celui-ci est calculé par rapport à la surface d'un cercle ayant pour rayon la distance entre l'arbre et le point considéré. Cette simulation traduit, en première approximation, la modification des profils de vent en fonction de la distance aux arbres. Mais cette approche demeure assez sommaire et si elle montre bien une atténuation du vent dans le sillage de l'arbre, elle ne permet pas d'explicitier les modifications en amont.

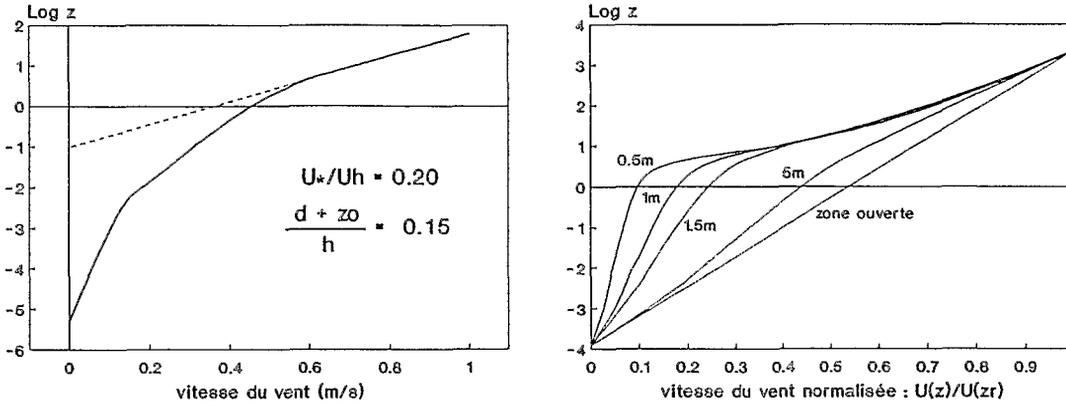


Figure 6 :

Modélisation des profils de vitesse du vent : a) simulation du profil à l'intérieur et au-dessus du couvert épars de Guiera. Les deux cassures du profil logarithmique se situent au voisinage du sommet de chacune des strates ; b) simulation de la modification du profil de vent en fonction de la distance aux buissons.

D'autre part, les équations d'évolution de la vitesse du vent, de la température et de l'humidité spécifique, couplées à un modèle de transfert radiatif dans la végétation, nous ont permis de résoudre l'équation du bilan d'énergie au niveau des différentes couches de végétation. Le modèle de transfert radiatif utilisé est un modèle mono-dimensionnel en milieu diffusant, supposant des rayonnements isotropes et une distribution aléatoire des normales, des surfaces végétales (MARQUES FILHO, 1991). Les échanges au niveau du sol sont simulés par un modèle simple de type mulch (SIFAOUI et PERRIER, 1978 ; CHOUDHURY et MONTEITH, 1988). Le modèle complet ainsi obtenu permet de calculer la contribution de chaque strate (sol, herbe, buissons) aux différents flux du bilan d'énergie : rayonnement net, chaleur sensible, chaleur latente et flux de conduction de chaleur dans le sol. Il permet également d'obtenir les profils des principales grandeurs transférées (vent, température, humidité). La figure 7 présente un exemple d'évolution des différents termes du bilan d'énergie et la contribution des différentes strates de végétation au flux de chaleur latente calculée par le modèle. Les transpirations de la strate herbacée et arbustive sont calculées sur la base de résistances

stomatiques constantes au cours de la journée, valant respectivement 100 et 200 s.m⁻¹. Ces résultats sont à comparer aux données expérimentales recueillies pour la même journée, et présentées sur la figure 4. La modélisation des différents flux semble plutôt satisfaisante. Néanmoins, bien que les flux de chaleur latente soient correctement simulés, le partage entre le flux de chaleur sensible et le flux de conduction de chaleur dans le sol reste imparfait. Une première explication possible est que la schématisation du sol par seulement deux couches (l'une sèche, l'autre saturée) est trop simple pour un sol sableux et ces conditions de forte demande climatique. En outre, bien que la somme des flux de chaleur latente du sol et de la strate herbacée soit en accord avec les mesures, une seconde explication pourrait être que la contribution du sol au flux de chaleur latente est surestimée, ce qui expliquerait la sous-estimation du flux de chaleur dans le sol. Les résultats expérimentaux ne permettent pas actuellement de trancher entre ces hypothèses.

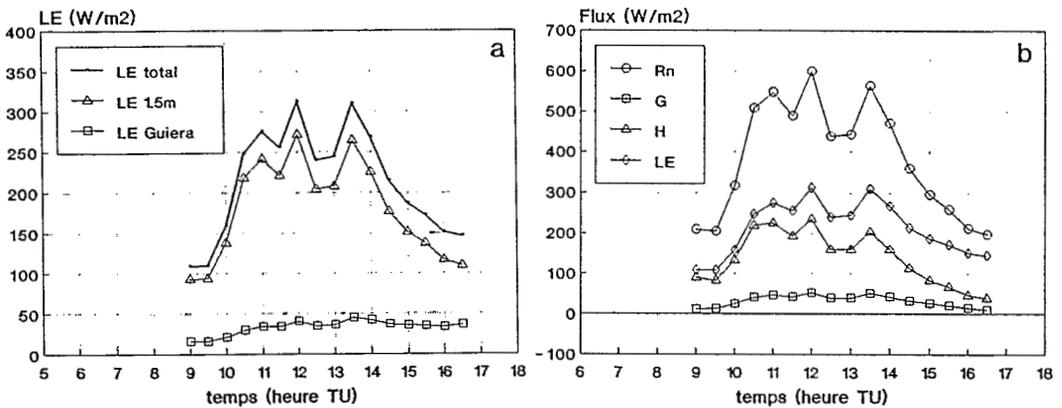


Figure 7 :

Flux turbulents de chaleur latente et sensible et bilan d'énergie calculés par le modèle, pour la même journée que sur la figure 4 : a) contributions de l'ensemble strate herbacée + sol (LE 1,5 m) et de la strate arbustive (LE Guiera) au flux total de chaleur latente de la végétation (LE total). Les transpirations de la strate herbacée et arbustive sont calculées sur la base de résistances stomatiques constantes au cours de la journée, valant respectivement 100 et 200 s.m⁻¹ ; b) simulation de l'évolution des différents termes du bilan d'énergie de la végétation au cours de la même journée.

CONCLUSION

Jusqu'à ces dernières années, l'étude des couverts hétérogènes, et en particulier des couverts épars, n'a été abordée que de façon partielle. De ce fait, dans les modèles climatiques, la modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau de ces surfaces ne rend pas suffisamment compte des hétérogénéités. C'est pourquoi un des objectifs principaux de l'expérience internationale Hapex-Sahel était l'analyse des effets intégrés des perturbations de la surface sur les échanges à grande échelle. Dans ce cadre, notre objectif était non seulement l'estimation des flux globaux, mais aussi une caractérisation des échanges au sein du couvert.

Les données expérimentales recueillies au cours de cette expérience ont permis d'obtenir une bonne caractérisation des interactions entre les deux strates de la végétation, et de mettre en évidence le rôle d'écran radiatif et convectif joué par la strate arbustive vis-à-vis de la strate herbacée.

L'approche agrométéorologique permet de quantifier de façon simple l'effet de l'atténuation de l'évaporation potentielle, et donc de décrire le fonctionnement hydrique de ce type de couverts. Elle devrait permettre de gérer les ressources en eau de ces végétations en fonction du climat et de définir la densité optimale de la strate supérieure.

Une telle approche permettrait difficilement de décrire la variabilité spatiale diurne et nocturne de l'ensemble des paramètres déterminant le bon fonctionnement de la strate productive (température minimale nocturne, maximale diurne, variation des bilans hydriques en fonction de la distance aux arbres, ...).

Aussi, si l'on veut mieux traduire les rôles de chaque strate dans le fonctionnement de ces couverts (notamment pour l'étude du bilan hydrique), l'approche mono-dimensionnelle multicouche est nécessaire. Les résultats qu'elle fournit peuvent être modulés en fonction de la distance à l'arbre, et peuvent donner une première estimation des gammes de variation qu'il est possible de rencontrer selon les positions par rapport aux arbres ou arbustes.

Enfin, si l'on souhaite décrire complètement cette hétérogénéité et ses conséquences microclimatiques sur le fonctionnement des plantes (température, déficit hydrique de l'air, rayonnements, bilan hydrique), une approche tri-dimensionnelle doit être envisagée.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRÉ J.C., GOUTORBE J.P., PERRIER A., BECKER F., BESSEMOULIN F., BOUGEAULT P., BRUNET Y., BRUTSAERT W., CARLSON T., CUENCA R., GASH J., GELPE J., HILDEBRAND P., LAGOUARDE J.P., LLOYD C., MAHRT L., MASCART P., MAZAUDIER C., NOILHAN J., OTTLE C., PAYEN M., PHULPIN T., STULL R., SHUTTLEWORTH J., SCHMUGGE T., TACONET O., TARRIEU C., THEPENIER R.M., VALANCOGNE C., VIDAL-MADJAR D., WEILL R., 1988. Evaporation over land-surfaces : First results from Hapex-Mobilhy special observing period. *Ann. Geophysicae*, 6 (5) : 477-492.
- BOLLE H.J., ANDRE J.C., ARRUE J.L., BARTH H.K., BESSEMOULIN P., BRASA A., DE BRUIN H.A.R., DUGDALE G., ENGMAN E.T., EVANS D.L., FANTECHI R., FIEDLER F., VAN DE GRIEND A., IMESON A.C., JOCHUM A., KABAT P., KRATZSCH T., LAGOUARDE J.P., LANGER I., LLAMAS R., LOPES-BAEZA E., MELI MIRALLES J., MUNIOSGUREN L.S., NERRY F., NOILHAN J., OLIVER H.R., ROTH R., SANCHEZ DIAZ J., DE SANTA ALALLA M., SHUTTLEWORTH W.J., SOGAARD H., STRICKER H., THORNES J., VAUCLIN M., WICKLAND D., 1993. Efedra : European Field Experiment in a Desertification-threatened Area. *Ann. Geophysicae*, 11 : 173-189.
- CHOUDHURY B.J., MONTEITH J.L., 1988. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 114 : 373-398.
- GARRAT J.R., 1978. Transfer characteristics for a heterogeneous surface of large aerodynamic roughness. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 104 : 491-502.
- GOUTORBE J.P., LEBEL T., TINGA A., BESSEMOULIN P., BROUWER J., DOLMAN A.J., ENGMAN E.T., GASH J.H.C., HOEPPFNER M., KABAT P., KERR Y.H., MONTENY B., PRINCE S., SAID F., SELLERS P., WALLACE J.S., 1994. Hapex-Sahel : a large scale study of land-atmosphere interactions in the semi arid tropics. *Ann. Geophysicae*, (sous presse).
- MARQUES FILHO A.O., 1991. Bilan énergétique d'une forêt équatoriale. Modélisation mathématique. Thèse de doctorat. INA PG, 183 p.

- PERRIER A., 1976. Étude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau de couverts végétaux : profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette. Thèse de doctorat d'état. Université Paris VI. 236 p.
- PRANDTL L., 1925. Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. *Z. Angew. Math. u. Mech.* 5.
- RAUPACH M.R., 1992. Drag and drag partition on rough surfaces. *Boundary-Layer Meteorol.*, 60 : 375-395.
- SHAW R.H., PEREIRA A.R., 1982. Aerodynamic roughness of a plant canopy : a numerical experiment, *Agric. Meteorol.*, 26 : 51-65.
- SELLERS P.J., HALL F.G., ASRAR G., STREBEL D.E., MURPHY R.E., 1992. An Overview of the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE). *J. Geophys. Res.*, 97 (17) : 18345-18371.
- SIFAOUI M.S., PERRIER A., 1978. Caractérisation de l'évaporation profonde. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21 : 629-637.
- STEINBERG S.L., VAN BAVEL C.H.M., MCFARLAND M.J., 1989. A gauge to measure mass flow in stems and trunks in woody plants. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 114 : 466-472.
- TUZET A., PERRIER A., CASTELL J.F., ZURFLUH O., 1993. Energy and water vapour transfers in a particular shrub-grass intercrop : the fallow savanna. *Int. Meeting on Ecophysiology of tropical intercropping*. Gosier, Guadeloupe, déc. 6-10 1993.