

MODELISATION DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE DANS LE SYSTÈME SOL-PLANTES-ATMOSPHERE. PROPOSITION DES SOLUTIONS DE PROTECTION DES CULTURES CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Mohamed Habib Sellami

Unité Recherche Rayonnement Thermique, Département de Physique,
Faculté des Sciences de Tunis, 2092 El manar II, Tunis, Tunisie
mh.sellami@planet.tn

RESUME

Dans ce travail nous allons s'intéresser à modéliser l'influence mutuelle entre la couche limite atmosphérique et les couverts végétaux afin d'étudier l'effet tampon des végétations vis à vis des impacts des changements climatiques, de déterminer les espèces, leurs densités et les superficies optimales pour accomplir ce rôle, de formuler les indicateurs écologiques nécessaires et de fixer les normes pour une lutte contre les effets des changements climatiques. Nous avons utilisé les équations de base qui décrivent le mouvement, le transfert de rayonnement, de chaleur et de masse pour formuler les phénomènes d'échange entre le sol, la plante et l'atmosphère. Les paramètres qui caractérisent le type du sol (structure et texture), la nature de l'espèce (plante, la densité et l'arrangement...), la qualité et la quantité de l'eau et les conditions climatiques (température, humidité, rayonnement solaire, vent) ont été considérés dans le calcul. Les premiers résultats concernant les échanges à l'intérieur des couverts végétaux ont déjà été publiés. Le modèle concernant les échanges entre végétaux et couche limite atmosphérique est l'objet de ce travail. Il va utiliser les résultats des précédents et dont la validation va se faire en se comparant aux mesures effectuées jusqu'à 140 m au-dessus des plantes.

NOMENCLATURE

K_m, K_h et K_q : les coefficients de diffusion turbulente du mouvement, de chaleur et d'humidité.

k : constante de Von Kerman généralement égale à 0.4.

c_f, c_h etc c_q : coefficients de transfert pour le mouvement, la chaleur et l'humidité

d : la hauteur de déplacement

E, H, H_r : les densités des flux de chaleur latente, sensible et radiative au-dessus de la végétation

h : la hauteur du couvert végétal

LAI : Leaf Area Index ou indice foliaire

\bar{q} : humidité spécifique moyenne dans l'air

q' : fluctuation de l'humidité spécifique

$\bar{q}_*, \bar{T}_*, \bar{u}_*$: les échelles de mouvement, de température et d'humidité

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$: vitesses moyennes dans les trois directions

u', v', w' : fluctuation de la vitesse du vent dans les trois directions

z_0, z_h, z_q : les longueurs de rugosité pour les profils de mouvement, de température et d'humidité

z/L : échelle de stabilité de l'atmosphère

$\bar{\theta}$: température moyenne de l'air

θ' : fluctuation de température de l'air

ρ : masse volumique de l'air

τ : contrainte de cisaillement de l'air au dessus de la végétation

Ψ_m, Ψ_h, Ψ_q : fonctions non dimensionnelles pour le mouvement, la température et l'humidité

1) INTRODUCTION

Le sol qui se présente comme la source de vie pour la faune et la flore peut aussi être considéré comme un capteur actif de mesure des effets et des impacts des différentes interactions qui engendrent des changements tel que le changement climatique. La plante considérée comme une pompe biologique qui absorbe du sol l'eau et les composantes utiles à la formation de sa biomasse et refoule dans l'atmosphère l'eau et les gaz comme le CO₂ joue le rôle d'un médiateur entre le sol et l'atmosphère. Elle aussi réagit biologiquement et physiologiquement comme réponse aux changements climatiques qui se manifestent. Donc elle peut être prise comme un capteur actif qui contrôle, mesure et influence ces changements. Etudier les causes et les effets des changements climatiques, prévoir les lieux et les timings de leurs actions et proposer les solutions et les remèdes pour empêcher si non minimiser leurs conséquences revient à modéliser les interactions entre le sol, les plantes et l'atmosphère en tenant compte de l'action de l'homme. Plusieurs études ont été réalisées pour modéliser ces interactions seulement la généralisation des résultats est un but qui n'a pas été achevé. Le travail que nous avons établis a concerné la modélisation des transferts de masse et d'énergie dans l'intervalle entre le sol et un plan de référence juste au-dessus des couverts végétaux. Les modèles élaborés sont applicables pour tous les types de sol, pour la majorité des espèces végétales et pour les différents arrangements entre elles. La continuité de ce travail consiste à modéliser les interactions entre ce plan de référence et l'atmosphère proche soit la couche limite atmosphérique dite d'Ekman qui s'étend sur quelques dizaines de mètre et qui est directement influencée par les phénomènes de transport au niveau de la végétation. La mise en équations et les principales formulations feront l'objet de cette communication.

2) EQUATIONS DE BASE POUR L'ETUDE DE L'INTERACTION SOL-PLANTE-ATMOSPHERE

Les équations de base utilisées pour la modélisation des phénomènes à l'échelle de l'atmosphère sont celles du mouvement, de conservation de la masse et de l'énergie. Les formulations établies résultent de la combinaison entre ces équations pour des échelles d'espace particulières, des pas de temps précises et en tenant compte de certaines hypothèses. On s'intéresse généralement à la variation moyenne et fluctuante de la température, à la variation moyenne et fluctuante de l'humidité et à la variation moyenne et fluctuante de la vitesse du vent. Puisque l'air est considéré comme un fluide incompressible, on peut présenter les équations de conservation de la température et de l'humidité sous les formes suivantes [1, 2, 3, 4]:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}'\theta') + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}'\theta') + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}'\theta') \right] + K_h \left[\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \right] - \frac{1}{\rho c_p} \left[\frac{\partial H_R}{\partial x} + \frac{\partial H_R}{\partial y} + \frac{\partial H_R}{\partial z} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}'q') + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}'q') + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}'q') \right] + K_q \nabla^2 \bar{q} \quad (2)$$

3) MODELISATION DES PHENOMENES DE TRANSPORT DANS LE SYSTEME SOL PLANTE ATMOSPHERE

3-1) Pour le domaine sol – couverts végétaux

Les travaux que nous avons réalisés consistent à modéliser les phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans l'intervalle sols-couverts végétaux pour différentes sortes de plante et plusieurs types de sol. Les modèles établis permettent d'estimer le besoin en eau exacte et les quantités normées d'engrais et des différents produits chimiques de traitement phytosanitaire à ajouter sans contaminer les nappes et endommager les sols ainsi que le suivi de l'état sanitaire des plantes. Nous avons donné des formulations des flux de rayonnement rediffusés (réfléchis, transmis et absorbé) à l'intérieur de la végétation, les flux des chaleurs sensible et latente échangés, la production en biomasse, les coefficients d'échanges, les résistances stomatiques et les résistances aérodynamiques. Ces grandeurs ont été exprimées comme fonction des paramètres qui caractérisent la végétation (les espèces et leurs arrangements), des paramètres qui caractérisent les sols (structure, texture, coefficients d'échanges) et les paramètres climatiques (rayonnements solaires, température et humidité de l'air, vitesse du vent). La validation de ces modèles a été faite pour le cas des oasis traditionnelles du sud tunisien à l'intérieur desquelles coexistent toutes les sortes de plantes avec les différentes architectures (cultures maraîchères, cultures céréalières, cultures fourragères, arboricultures et palmiers dattiers) [5-8]. L'extension des résultats de ces modèles a été réalisée pour les oasis traditionnelles du Nord d'Afrique [9]. Nous avons ainsi estimé les flux de chaleurs résultants au niveau d'un plan de référence juste au-dessus de la végétation qui vont se transférer vers l'atmosphère.

3-2) Pour le domaine couverts végétaux – atmosphère

Dans cette partie nous allons nous intéresser à modéliser l'influence mutuelle entre la couche limite atmosphérique et les couverts végétaux afin d'étudier l'effet tampon des végétations vis à vis des impacts des changements climatiques, de déterminer les espèces, leurs densités et les superficies optimales pour accomplir ce rôle, de formuler les indicateurs écologiques nécessaires et de fixer les normes pour une lutte contre les effets des changements climatiques.

3-2-1) Description de la couche limite atmosphérique

La couche limite atmosphérique (CLA), représente la partie de l'atmosphère où l'effet direct de la surface du sol sur le transfert turbulent est notable [1-3, 10]. La partie la plus basse de la CLA, où l'écoulement est pleinement développé, et où les flux turbulents verticaux sont pratiquement constants et égaux à leurs valeurs à la surface est dite couche limite de surface ou encore couche Ekman. Au-dessus d'un couvert développé (Forêt, oasis etc...), la couche limite de surface, comprend deux sous-couches:

- Une sous - couche dite inertielle, où l'altitude constitue l'unique échelle de longueur, dans les conditions d'adiabaticité, et où les profils semi - logarithmiques et leurs extensions sont valables.
- Une sous - couche dite de rugosité, située dans le voisinage immédiat de la surface du couvert, où l'écoulement de l'air dépend des échelles de longueur du couvert.

Donc pour l'estimation des flux à différents niveaux au-dessus de la végétation nous devons tenir compte de l'altitude des points représentatifs que ce soit pour le calcul ou les mesures.

3-2-2) Formulations des flux échangés au-dessus d'un couvert végétal

Pour tenir compte de la présence des feuilles et leurs influences sur les flux juste au-dessus, nous allons considérer les modèles à couche unique, qui traitent le couvert végétal comme un plan au fond de la couche limite atmosphérique. Ces modèles utilisent les lois logarithmiques de transfert de mouvement, de chaleur et d'humidité. Le profil de la vitesse du vent au-dessus d'un couvert végétal suit une loi logarithmique qui s'écrit sous la forme [1-3, 11]:

$$\bar{u}(z) = \frac{u^*}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) - \psi_m \left[\frac{z-d}{L} \right] \right] \quad (3)$$

Les profils de température et d'humidité à un niveau au-dessus d'un couvert végétal suivent la même analogie que celle de la vitesse du vent on écrit [1-3,11]:

$$\begin{aligned}\bar{\theta}(z) - \bar{\theta}_0 &= \frac{T_*}{k} \left\{ \ln \left[\frac{z-d}{z_h} \right] - \psi_h \left[\frac{z-d}{L} \right] \right\} \\ \bar{q}(z) - \bar{q}_0 &= \frac{q_*}{k} \left\{ \ln \left[\frac{z-d}{z_q} \right] - \psi_q \left[\frac{z-d}{L} \right] \right\}\end{aligned}\quad (4)$$

Les fonctions non dimensionnelles de la couche surfacique au-dessus d'un couvert végétal (ψ_m, ψ_h, ψ_q) s'écrivent sous les formes suivantes:

$$\begin{aligned}\psi_m &= \frac{k(z-d)}{u_*} \frac{\delta \bar{u}}{\delta z} \\ \psi_h &= \frac{k(z-d)}{T_*} \frac{\delta \bar{\theta}}{\delta z} \\ \psi_q &= \frac{k(z-d)}{q_*} \frac{\delta \bar{q}}{\delta z}\end{aligned}\quad (5)$$

Ce qui nous permet d'écrire les expressions des flux de mouvement, de chaleur sensible et de chaleur latente comme suit :

$$\begin{aligned}\frac{\tau}{\rho} &= u_*^2 = \left[k(z-d) u_* \psi_m^{-1} \right] \frac{\delta \bar{u}}{\delta z} = K_m \frac{\delta \bar{u}}{\delta z} \\ \frac{H}{\rho c_p} &= -u_* T_* = - \left[k(z-d) u_* \psi_h^{-1} \right] \frac{\delta \bar{\theta}}{\delta z} = -K_h \frac{\delta \bar{\theta}}{\delta z} \\ \frac{E}{\rho} &= -u_* q_* = - \left[k(z-d) u_* \psi_q^{-1} \right] \frac{\delta \bar{q}}{\delta z} = -K_q \frac{\delta \bar{q}}{\delta z}\end{aligned}\quad (6)$$

Il existe plusieurs formules empiriques qui expriment les fonctions ψ_m, ψ_h et ψ_q et qui ont été appliquées par plusieurs chercheurs pour l'étude des transferts au-dessus des couverts végétaux. Nous donnons les suivantes [1-4, 10, 11] :

$$\begin{aligned}
 \psi_m &= (1 + 16|z/L|)^{-1/4}; -2 \leq z/L \leq 0 \\
 \psi_m &= 1 + 5(z/L); 0 \leq z/L \leq 0 \\
 \psi_h &= (1 + 16|z/L|)^{-1/2}; -2 \leq z/L \leq 0 \\
 \psi_h &= 1 + 5z/L; 0 \leq z/L \leq 0 \\
 \psi_w &= 1.25(1 + 3|z/L|)^{1/3}; -2 \leq z/L \leq 0 \\
 \psi_w &= 1.25(1 + 0.2(z/L)); 0 \leq z/L \leq 1
 \end{aligned} \tag{7}$$

Les coefficients de diffusion turbulente sont exprimés comme suit:

$$\begin{aligned}
 K_m &= ku_*(z-d) / \psi_m(z/L) \\
 K_h &= ku_*(z-d) / \psi_h(z/L) \\
 K_w &= ku_*(z-d) / \psi_w(z/L)
 \end{aligned} \tag{8}$$

Pour un couvert végétal dont l'indice foliaire est connu, on peut exprimer la hauteur de déplacement et la longueur de rugosité par les formules empiriques suivantes [4, 11, 12]:

$$d/h = 1 - (2/LAI)[1 - \exp(-LAI/2)] \tag{9}$$

$$z/h = [1 - \exp(-LAI/2)]\exp(-LAI/2) \tag{10}$$

4) DISCUSSION

La modélisation des échanges au-dessus des végétations est basée principalement sur l'application des équations des mouvements et des conservations de la masse et de l'énergie usuelles. Seulement la variabilité des paramètres dans l'espace et dans le temps que se soit pour les valeurs moyennes ou fluctuantes, l'hétérogénéité de l'atmosphère à l'échelle macro et micro (couche limite atmosphérique, couche limite de surface, couche inertielle, couche de rugosité...), le chevauchement entre les régimes des écoulements et leurs superpositions (laminaire, transitoire, turbulent...), la non-homogénéité horizontale des structures dynamique et thermique des couverts végétaux qui dépendent de l'espèce même (sa densité, sa physiologie, sa biologie, type de sol et superficie occupée...), la superposition à l'écoulement moyen des tourbillons ou des mouvements convectif (flux sortants des végétations et des sols) qui pénètrent jusqu'au sommet de la sous-couche de rugosité accroissant ainsi les processus de transport turbulent dans cette sous-couche, rendent la tâche difficile et exigent l'introduction de plusieurs hypothèses simplificatrices, l'usage des relations empiriques déjà établies et le développement d'autres propres aux cas à étudier. En effet, les études menées sur des couverts développés et qui s'appuient sur des mesures effectuées dans le voisinage immédiat du sommet des arbres, c'est à dire dans la sous - couche de rugosité sont confrontées au problème de la non - validité des relations flux - profils classiquement utilisées au-dessus des couverts peu développés [4, 10-12]. La question qui se pose est que les relations flux-profiles établies dans la sous couche inertielle ne sont plus valables dans la sous-couche de rugosité ?.

5) CONCLUSION

Nous nous sommes intéressés dans ce travail à la modélisation des échanges entre la couche limite atmosphérique et un couvert végétal présentant la majorité des espèces végétales et dont l'agencement entre les espèces est très aléatoire. Ce couvert végétal est représenté par les oasis

traditionnelles. Les résultats des modèles établis et des mesures effectuées ont concerné les échanges à l'intérieur des oasis traditionnelles du sud tunisien et du Nord d'Afrique ce qui nous a permis de déterminer les différents coefficients d'échanges et les flux sortants vers l'atmosphère [5-9]. La modélisation concernant l'échange entre le couvert oasien et l'atmosphère, qui est l'objet de ce travail, a été présentée et les équations de base ont été détaillées. La validation et les tests de sensibilité sont en cours. Ceci en se comparant aux mesures effectuées à différents niveaux à partir du sol jusqu'à 140 m au-dessus des oasis. Nous optons aussi tester la possibilité de relier le modèle avec les imageries aériennes (satellites, radars, lidars...) afin de voir s'il peut être adopté comme un modèle numérique de terrain généralisé.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. Brutsaert, «Evaporation into the atmosphere. Theory, History, and Applications» 1982, D. Reidel Publishing Company, 1^{ère} édition, Holland, 291 pages.
- [2] A. Poggi «Introduction à la micro météorologie. Transfert d'énergie atmosphère-sol» 1977, Masson, Paris, 148 pages.
- [3] O.M. Ashford and S. Jovicic «Physical and Dynamic Climatology» 1971, World Meteorological Organization, Leningrad 400 pages.
- [4] C.V. Grancher, R. Bonhomme et H. Sinoquet «Crop structure and light microclimate. Characterization and applications», 1993, INRA, Paris, 518 pages.
- [5] M.H. Sellami et M.S. Sifaoui, 1998 «measurement of microclimatic factors inside the oasis: interception and sharing of solar radiation » International Journal of Renewable Energy, 13/1, pp 67-76.
- [6] M.H. Sellami et M.S. Sifaoui, 1999 «Modelling solar radiative transfer inside the oasis: Experimental validation » Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 63/1 pp 85-96.
- [7] M.H. Sellami et M.S. Sifaoui, 2003 "Estimating transpiration in an intercropping system: measuring sap flow inside the oasis " Agricultural Water Management 59, pp.191-204
- [8] M.H. Sellami et M.S. Sifaoui, 2008 "Modelling of heat and mass transfer inside a traditional oasis. Experimental validation", International Journal of Ecological Modelling; 210, pp. 144-154.
- [9] M.H. Sellami « A scientific guide for agricultural water management and biodiversity conservation inside the North African oasis » 2008. Chapter In: Agricultural Water Management Research Trends . ISBN 978-1-60456-159-3. Editor: Magnus L. Sorensen. Nova Science Publishers, Inc. New York 304 pages; pp.171-212
- [10] E.F. Yepdjou «Modélisation des échanges énergétiques et hydriques dans le système sol plante atmosphère» 1987, Thèse, université Catholique de Louvain, 297 pages.
- [11] C. Riou «La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale» 1975, ORSTOM, 1^{ère} édition, Paris, 236 pages.
- [12] C. Floret et R. Pontanier «Relations climat sol végétation dans quelques formations végétales spontanées du sud tunisien» 1978, CNRS Montpellier, Document technique n°1, 96 pages.