

I.R.D.

Institut de Recherche pour le Développement



Rapport de mission

Du 22 au 29 avril 2009

« Mesures et modélisation des échanges d'énergie et de masse entre les forêts et l'atmosphère »

Katedra Botaniki Leśnej – Szkoła Główna Gospodarki Wiejskiej (Ecole Agronomique) – SGGW, Varsovie, Pologne

Georges Nizinski

Institut de Recherche pour le Développement, IRD-UR Clifa, Unité de Recherche 060 « Climat et Fonctionnement des Agro-écosystèmes – rôle de l'agrodiversité dans la stabilité de la production » - UR 060 « CLIFA », Centre de Montpellier, B.P. 64501, 911, Avenue Agropolis, 34394 Montpellier cedex 5, Téléphone : 04-67-41-61-00, fax: 04-67-41-63-30 ; e-mail: georges.nizinski@ird.fr

Ce rapport contient:

A) Cadre général de la mission

B) Déroulement de la mission

C) Résultats de la mission

D) Photos

- **Annexe n°1** – Exposé n°1 du 23 avril 2009
- **Annexe n°2** – Exposé n°2 du 29 avril 2009

A) Cadre général de la mission

Ma mission en Pologne avait trois objectifs: 1^{er}) répondre à l'invitation du Dr Jerzy Piętka¹ de l'Académie des Sciences (Varsovie, PAN-Polska Akademia Nauk); 2^{ème}) faire connaître les activités de l'IRD et en particuliers mes activités de recherche en bioclimatologie au sein de l'Unité de Recherche 060 « Clifa » aux membre de l'Académie des Sciences, aux membres de l'École agronomique (Szkoła Główna Gospodarki Wiejskiej – SGGW) et à tous les chercheurs réunis pour les deux conférences des 23 et 29 avril; et 3^{ème}) établir une éventuelle collaboration scientifique avec l'Académie des Sciences de Varsovie pour mettre en place un programme de recherche.

Cette mission, du 22 au 29 avril 2009, a pu avoir lieu grâce à l'appui logistique et financier de l'Académie des Sciences de Pologne sur invitation du Dr Jerzy Piętka.

Les conférences ont eu lieu les 23 et 29 avril à Polskie Towarzystwo Botaniczne, Oddział Warszawski² dans les locaux de Katedra Botaniki Leśnej de l'Ecole Agronomique – SGGW.

Je remercie Dr hab. Jacek Zakrzewski³, Professeur (Szkoła Główna Gospodarki Wiejskiej – SGGW), Katedra Botaniki Leśnej, et le Représentant de l'Académie des Sciences Dr Jerzy Piętka pour leur accueil et leur aide.

B) Déroulement de la mission

La mission s'est déroulée d'après le programme préparé par Dr Jerzy Piętka. Il y a eu quatre sessions de travail consacrées aux deux conférences et deux sessions consacrées à un projet de recherche qui associera l'Académie des Sciences Polonaise (Dr Jerzy Piętka), l'École Agronomique (Dr Andrzej Boczoń⁴ et Dr Katarzyna Maciarska⁵) et moi-même, Georges Nizinski de l'IRD-UR060 « Clifa ».

¹ Jerzy Pietka : jerzy.pietka@ibib.waw.pl

² Polskie Towarzystwo Botaniczne, Oddział Warszawski: www.ptb.waw.pl; Katedra Botaniki Leśnej, 02-776 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159, Pologne

³ Jacek Zakrzewski: jacek.zakrzewski@wl.sggw.pl

⁴ Andrzej Boczoń : a.boczon@ibles.waw.pl

⁵ Katarzyna Maciarska : kasia@wl.sggw.pl

Nous avons débattu de la possibilité d'élargir ce projet à d'autres partenaires travaillant sur des plantations de ligneux en zone tempérée et tropicale. Nous avons abordé les aspects pratiques de fonctionnement de cette éventuelle collaboration: échanges d'informations, propriété des résultats, politique de publication, organisation du réseau, nouveaux sites et perspectives de développement du réseau.

- le 21 avril : départ de Paris pour Varsovie.
- le 22 juin : (a) de 9h00 à 12h00: réunion avec Dr Jerzy Piętka; discussion du calendrier de ma mission à Varsovie; (b) de 14h00 à 18h00: réunion de travail avec Dr Jerzy Piętka; présentation de l'exposé proposé pour le 23 avril.
- le 23 avril : (a) de 9h00 à 12h00: réunion de travail; travail sur l'exposé proposé en version polonaise (voir **Annexe n°1**); (b) de 16h30 à 18h30: conférence au Département de Botanique Forestière (**Photo n° 1**).
- le 24 avril : séjour à Szkoła Główna Gospodarki Wiejskiej (SGGW - Ecole Agronomique). De 9h00 à 16h00: réunion avec les chercheurs de SGGW, Dr Andrzej Boczoń et Dr Katarzyna Maciarewska; j'y ai exposé l'intérêt des études écophysiologiques dans la conduite des plantations de ligneux. Dr Jerzy Piętka était présent.
- le 25 avril : (a) de 9h00 à 12h00: visite du Palais Royal de Varsovie (**Photo n° 2**); (b) de 14h00 à 18h00: visite de Palais Royal de Willanów (**Photo n°3**); visite de Museum d'affiche de Willanów.
- Le 26 avril : de 9h00 à 12h00 et de 14h00 à 18h00: visite de Palais Royal de Łazienki (**Photo n° 4**); (b) de 14h00 à 18h00: Muséum National de Varsovie.
- les 27 et 28 avril : de 9h00 à 12h00: réunion de travail avec Dr Jerzy Piętka; présentation de l'exposé proposé en version française pour le 29 avril (voir **Annexe n°2**).
- le 29 avril: (a) de 9h00 à 12h00: réunion de travail (suite); (b) de 16h30 à 18h30: conférence au Département d'Agronomie.
- le 30 avril: départ de Varsovie pour Paris.

C) Résultats de la mission

Les réunions de travail m'ont permis de discuter avec la communauté scientifique de l'Académie des Sciences et de l'École agronomique travaillant sur des plantations de ligneux,

d'entrer en contact avec des chercheurs que je ne connaissais que par leurs publications et de définir des méthodes et des cadres appropriés pour un éventuel travail en commun.

Lors de mes conférences de nombreuses spécialités étaient représentées: hydrologie, écophysiologie, bioclimatologie, foresterie, génétique, agronomie, économie.

Mes deux communications s'intitulent, la première en polonais « *Pomiary i modelowanie bilansu wodnego w lasach* » (**Annexe n°1**) et la seconde en français « *Evapotranspiration d'un couvert ligneux* » (**Annexe n°2**).

Cette mission m'a permis de faire le point sur les travaux récents en foresterie en zone tempérée, en Pologne.

D) Photos

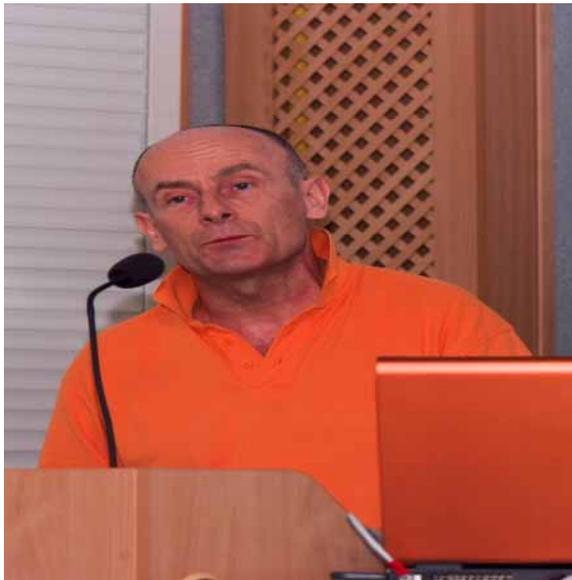


Photo n°1 – Conférence à Polskie Towarzystwo Botaniczne



Photo n°2 – Palais Royal de Varsovie



Photo n°3 – Palais Royal de Willanów



Photo n°4 – Palais Royal de Łazienki

Annexe n°2

Exposé n°2 du 29 avril 2009

de 16h45 à 18h45

Conférence à Polskie Towarzystwo Agronomiczne



Exposé n°2 du 29 avril 2009

Evapotranspiration d'un couvert ligneux (DIAPO n°1)

Mesdames, Messieurs, tout d'abord, je vous remercie tous d'être ici pour cette conférence.

Sur ces diapos je vous présente la structure de notre exposé (DIAPO n°2).

On va commencer par définir les bases physiques du calcul de l'évaporation d'une surface mouillée puis de l'évapotranspiration d'un couvert végétal fermé d'après la méthode de Penman-Monteith.

Dans tous mes travaux, pour la chénaie tempérée, la steppe sahélienne, la savane du littoral congolais et les plantations d'Eucalyptus, j'ai utilisé la méthode de l'équation du bilan hydrique et de l'équation de Penman-Monteith.

Le pas de temps de mesure minimal pour l'équation du bilan est la semaine, le temps d'un rééquilibrage du contenu en eau du sol, hormis les périodes d'entrée ou de sortie d'eau massives (avant et après une pluie, quelques jours avant et après une sécheresse marquée).

Le pas de temps pour la méthode de Penman-Monteith est l'heure ou supérieur à l'heure.

J'ai par ailleurs utilisé la méthode du rapport de Bowen pour la savane du littoral congolais (pas de temps de vingt minutes) et celle du flux de sève pour les plantations d'Eucalyptus congolaises (pas de temps instantané).

L'échelle choisie pour la modélisation de l'évapotranspiration est la journée, les conditions sont celles dites du « flux conservatif » pour lesquelles l'absorption est égale à la transpiration, ce qui est rarement le cas dans la réalité pour une échelle de temps inférieure à la journée, au cours de laquelle il y a déshydratation et réhydratation de la plante, mais ce qui est réaliste pour un pas de temps de 24 heures.

Historiquement Penman en 1948 puis Monteith en 1965 ont posé les bases physiques du calcul de l'évaporation d'une surface mouillée puis de l'évapotranspiration d'un couvert végétal fermé.

L'équation dite de Penman associe la méthode du profil aérodynamique et celle du bilan d'énergie, en supposant de coefficients de transfert turbulent d'énergie et de masse identiques ($k_H \approx k_E$).

En associant les deux équations pour éliminer la température de surface, difficile à mesurer, on obtient l'équation de Penman (**DIAPO n°3**):

$$ETP = \frac{\frac{\Delta \cdot R_n}{\lambda} + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma}$$

Avec:

ETP - évapotranspiration potentielle, en mm jour⁻¹;

Δ - dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en kPa °C⁻¹;

R_n - rayonnement net ou effectif, en MJ m⁻² jour⁻¹;

λ - chaleur latente de vaporisation, en MJ kg⁻¹ (2451,8 J g⁻¹), soit 2,45 MJ kg⁻¹;

γ - constante psychrométrique, en kPa °C⁻¹;

E_a - évaporation d'une surface dont la température serait celle de l'air, mesurée sous abri, en mm jour⁻¹;

(DIAPO n°4)

$$E_a = 2,6 (e_{s(t)} - e_{a(t)}) (1 + 0,537 u_{2M})$$

Ou:

$e_{s(t)}$ - pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface t, kPa;

u_{2M} - vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol, en m s⁻¹

(DIAPO n°5)

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\lambda \frac{M_{eau}}{M_{air}}}$$

Avec:

c_p - chaleur massique de l'air, en J kg⁻¹ (1012 J kg⁻¹);

P - pression atmosphérique, en kPa;

M_{EAU} - masse molaire de l'eau, en kg mole⁻¹ (18.10⁻³ kg mole⁻¹);

M_{AIR} - masse molaire de l'air, en kg mole⁻¹ (29.10⁻³ kg mole⁻¹)

(DIAPO n°6)

$$\Delta = \frac{des(T)}{dT} \text{ et } T = T_a$$

Avec:

$e_{s(T)}$ - pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface T, en kPa ;
T - température de la surface, en °C ;
 T_a - température de l'air, en °C

(DIAPO n°7)

$$Rn = Rg \cdot (1 - a) - (Ra - Rt) \quad \text{et} \quad Rn = H + \lambda E + Gs$$

Avec:

R_g - rayonnement solaire global, en $W m^{-2}$;
 R_a - rayonnement atmosphérique, en $W m^{-2}$;
 R_t - rayonnement terrestre, en $W m^{-2}$;
a - albédo (fraction du rayonnement réfléchi pour une longueur spécifique) ;
H - flux de chaleur sensible, en $W m^{-2}$;
 λE - flux de chaleur latente d'évaporation, en $W m^{-2}$;
 G_s - flux de chaleur dans le sol, en $W m^{-2}$

(DIAPO n°8)

$$Gs = cs \cdot d \cdot \left[\frac{Ts \cdot (t + \Delta t) - Ts(t)}{\Delta t} \right]$$

Avec:

c_s - capacité thermique du sol, en $J m^{-3} \text{ } ^\circ K^{-1}$ ($1,96 \times 10^6 J m^{-3} K^{-1}$) ;
 Δt - pas de temps des calculs, en seconde ;
 $T_s(t+\Delta t)$ - température moyenne du sol à profondeur z, en °C ;
 $T_s(t)$ - température moyenne à profondeur z, en °C ;
d - épaisseur de la couche de sol prise en compte (d) entre les capteurs à z_1 et à z_2 de profondeur, en m

Pour les surfaces présentant une très petite pente, uniformes et suffisamment étendues (un rapport hauteur de peuplement / étendue horizontale de 1:100), les flux de chaleur sensible et de chaleur latente sont considérés comme verticaux et on applique le principe de « similarité » entre les coefficients de transfert de chaleur sensible (k_H) et de chaleur latente (k_E), ainsi: $k_H \approx k_E$.

Les relations empiriques entre flux et gradients verticaux des chaleurs sensible et latente peuvent s'écrire:

(DIAPO n°9)

$$H = -\rho a \cdot cp \cdot Kh \cdot \left(\frac{\delta T}{\delta z} \right) \quad \text{et} \quad \lambda E = -\left(\frac{\rho a \cdot cp}{\gamma} \right) \cdot Ke \left(\frac{\delta e}{\delta z} \right)$$

Avec:

ρ_a - densité de l'air, en kg m^{-3} ;

c_p - chaleur massique de l'air, en $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

K_H - coefficient de transfert turbulent de chaleur sensible, en $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$;

T - température de l'air, en $^\circ\text{C}$;

z - altitude, en m ;

$(\partial T/\partial z)$ - gradient vertical de température, en $^\circ\text{C m}^{-1}$;

K_E - coefficient de transfert turbulent de masse, en $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$;

e - pression actuelle de vapeur d'eau dans l'air, en kPa ;

$(\partial e/\partial z)$ - gradient vertical de pression de vapeur d'eau dans l'air, en kPa m^{-1}

Equation dite de Penman-Monteith (**DIAPO n°10**):

Erreur ! Signet non défini.
$$ETR = \frac{ETP}{\left(1 + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma}\right) \cdot \left(\frac{rc}{ra}\right)\right)}$$

Avec:

ETR - évapotranspiration réelle, en mm jour^{-1} ;

ETP - évapotranspiration potentielle, en mm jour^{-1} ;

LAI - indice foliaire du couvert, sans unité ;

r_a - résistance aérodynamique du couvert, en s cm^{-1} ; r_c - résistance du couvert, en s cm^{-1}

Cette équation suppose de quantifier la **résistance aérodynamique** du couvert (r_a), la **résistance de surface du couvert** (dite résistance du couvert) (r_c) et les variables climatiques.

La résistance aérodynamique est une grandeur physique qui rend compte de la diffusion de chaleur ou de vapeur d'eau de la surface des feuilles vers l'atmosphère.

La résistance du couvert (r_c) comporte en plus un terme biologique qui rend compte de la diffusion de la vapeur d'eau issue des feuilles, la résistance stomatique des feuilles à la diffusion de la vapeur d'eau, r_{st} .

On utilise pour des couverts fermés les équations simplifiées suivantes (**DIAPO n°11**):

$$ra = \frac{rb}{LAI} + ra(1)$$

$$rc = \frac{rb + rst}{LAI} + ra(1)$$

Avec:

r_b – résistance de couche limite de la feuille ;

LAI – indice foliaire ;

$r_{a(1)}$ - résistance aérodynamique entre le milieu du couvert et la hauteur de mesure ;

r_{st} - résistance stomatique de la feuille à la diffusion de vapeur d'eau

Ces équations supposent que les résistances des feuilles de l'ensemble du couvert sont identiques à tout instant, or ce n'est pas le cas: du haut vers le bas du couvert il y a augmentation de r_b due à diminution de la vitesse du vent;

Il y a augmentation de r_{st} due à la diminution de l'éclairement; par ailleurs les conditions de croissance des feuilles dépendant de leur position dans l'architecture du couvert, les feuilles de haut et du bas du couvert n'ont pas les mêmes caractéristiques physiologiques (feuilles dites « d'ombre » et « de lumière »).

La résistance aérodynamique (r_a) (DIAPO n°12)

La résistance aérodynamique (r_a) est composée des résistances à la diffusion de la chaleur ou de la vapeur d'eau de la couche limite des feuilles et de la résistance de l'air entre le milieu du couvert (moyenne de la hauteur de ce couvert) et la hauteur au dessus du couvert où techniquement il est possible de mesurer les variables météorologiques.

On évalue r_a ou son inverse $1/r_a = g_a$, conductance aérodynamique, en supposant l'égalité entre transport de chaleur (k_H) et transport de quantité de mouvement (k_V) ($k_H \approx k_V$) (DIAPO n°13):

$$r_a = \left(\frac{1}{k^2 \cdot u_{2m}} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2$$

Avec:

r_a - résistance aérodynamique, en $s \text{ cm}^{-1}$;

k - constante de Von Karman (0,39) ;

u_{2m} - vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol, en $m \text{ s}^{-1}$;

z - niveau considéré, en m ;

z_0 - longueur de rugosité, en m ;

d - hauteur du déplacement, en m.

Pour les savanes (steppe sahélienne et savane du littoral congolais), j'ai estimé g_a à partir des profils de la vitesse du vent au dessus de ces couverts herbacés (de $2,5 \text{ cm s}^{-1}$ à 5 cm s^{-1}); pour les couverts arborescents (chênaie, plantation d'Eucalyptus et d'hévéa) j'ai calculé g_a à partir de la hauteur du peuplement :

$d=0,75 \text{ h}$ et $z_0=0,1 \text{ h}$;

Avec:

d - hauteur de déplacement, en m;

z_0 - longueur de rugosité, en m;
 h - hauteur du peuplement, en m (de 5 cm s⁻¹ à 10 cm s⁻¹).

L'ensemble des valeurs de la résistance aérodynamique rendent compte du fait que la résistance diminue avec la rugosité du couvert et avec la vitesse du vent.

Il faut noter que ce n'est pas un paramètre très sensible et qu'une petite erreur sur r_a a peu de répercussion.

Pour les couverts épars, le calcul de la résistance aérodynamique n'a pour l'instant pas de solution théorique; pour la steppe sahélienne composée à 80 % de zones herbacées (bosquets d'arbres peu denses) j'ai supposé l'égalité des résistances aérodynamiques entre zones herbacées et bosquets, ce qui, compte tenu de la faible densité des arbres au sein des bosquets reste raisonnable: la résistance est d'autant plus élevée que la densité est faible;

Par ailleurs, en ce qui concerne l'estimation de l'interception (seule la résistance aérodynamique intervient), on peut supposer qu'on ne la surestime pas trop car les pluies sont de grande intensité et la capacité de rétention des couronnes et troncs est faible (2,9-3,8 mm pour *Balanites aegyptiaca* et *Acacia raddiana*).

Les valeurs maximales de l'interception des bosquets de *Balanites aegyptiaca* et d'*Acacia raddiana* sont de 8,4 et 12,4 % des précipitations incidentes alors qu'elles peuvent atteindre 40 % des précipitations incidentes (P_i) pour le chêne en zone tempérée (forêt de Fontainebleau);

Les valeurs maximales de l'interception des bosquets (8,4 et 12,4 % P_i) sont du même ordre de grandeur que celle des zones herbacées de la savane sahélienne (7,5 % de P_i) et de la savane du littoral congolais (7 % de P_i).

La résistance du couvert (DIAPO n°14)

La résistance du couvert (r_c) dépend des résistances stomatiques des feuilles de ce couvert (r_{st}) et de l'indice foliaire (LAI);

La transpiration du couvert est la somme des transpirations de l'ensemble des feuilles, chaque feuille ayant une résistance stomatique donnée instantanée dépendante de ses caractéristiques physiologiques propres et du microclimat auquel elle est soumise.

La résistance stomatique (r_{st}): les mouvements stomatiques (dépendant de la turgescence des cellules de garde) sont sous le contrôle du rayonnement incident, de l'état hydrique de l'air, de l'état hydrique du sol et de l'état hydrique des feuilles.

Les mécanismes par lesquels les stomates répondent aux trois derniers facteurs sont encore discutés:

- concernant l'état hydrique de l'atmosphère, il devient de plus en plus discuté que les stomates soient dépendants de l'humidité relative de l'air. Ils seraient dépendants du déficit de saturation de l'air associé au flux d'eau à l'intérieur de la feuille, mais on ignore par quels mécanismes.
- concernant l'état hydrique du sol, on a longtemps expliqué l'action de ce dernier sur les mouvements stomatiques par son action sur l'état hydrique des feuilles: ainsi une baisse du potentiel hydrique du sol entraînerait une baisse du potentiel hydrique des feuilles qui entraînerait à partir d'un potentiel seuil une fermeture des stomates, mais on sait aujourd'hui qu'une plante bien alimentée en eau mais soumise à des potentiels hydriques du sol élevés (artifice expérimental) fermera ses stomates: les racines, au contact d'un sol desséché, synthétiseraient de l'acide abscissique qui agirait directement sur les stomates, quel que soit l'état hydrique de la plante.

Parmi les espèces que j'ai étudiées, *Balanites aegyptiaca* pourrait répondre à ce cas de figure:

En période de dessèchement du sol, avec des horizons supérieurs du sol n'offrant plus d'eau disponible pour la plante et avec des horizons plus profonds ayant encore de l'eau disponible, *Balanites aegyptiaca* fermera ses stomates (en fonction des journées, même en fin de nuit – lever du soleil, il peut ne pas y avoir ouverture stomatique).

- concernant l'état hydrique de la plante, il n'existe pas de relation causale simple entre les mouvements stomatiques et le potentiel hydrique foliaire: ainsi à potentiel hydrique foliaire égal les stomates sont fermés la nuit et ouverts le jour; en fonction de l'espèce, le dessèchement du sol provoque une fermeture stomatique, avec ou non incidence sur le potentiel hydrique foliaire.

Les espèces sur lesquelles j'ai travaillé répondent au 1^{er} cas de figure à l'exception de *Balanites aegyptiaca*.

Lors d'une période de dessèchement du sol *Balanites aegyptiaca* a une stratégie de modification de l'indice foliaire (chute des feuilles) associée au maintien d'un potentiel hydrique foliaire élevé pour les feuilles restantes (pendant une période dépendante de la période de sécheresse).

Parmi les régulations d'une plante soumise à la sécheresse, il y a celles relatives au flux d'eau dans la plante et celles relatives à la distribution des assimilats, en général une part plus importante du carbone est destinée aux racines et/ou il y a réduction de la croissance foliaire et accélération de la sénescence.

La résistance stomatique est généralement systématiquement mesurée sur le terrain – ce que j'ai fait - mais actuellement on ne dispose que de modèles empiriques pour rendre compte des variations de cette résistance avec les facteurs du milieu.

La résistance stomatique d'une feuille peut être calculée à l'aide des modèles empiriques de Jarvis et Stewart à partir

- des relations entre la résistance stomatique minimale d'une feuille (r_{st-min}),
- le potentiel hydrique des feuilles,

- le rayonnement global (R_g),
- le déficit de saturation de l'air ($e_{s(t)} - e_{a(t)}$) et
- la réserve en eau du sol ($R_{CC} - R$), soit:

$$r_{st} = r_{st} \cdot \min \cdot (f(R_g)) \cdot (g(\Psi_{\text{foliaire}})) \cdot (h(e_s(T) - e_a(T))) \cdot (i(R_{CC} - R))$$

(**DIAPO n°15**)

Avec:

r_{st} - résistance stomatique d'une feuille, en $s \text{ cm}^{-1}$;
 $r_{st-\text{min}}$ - résistance stomatique minimale, en $s \text{ cm}^{-1}$;
 Ψ_{foliaire} - potentiel hydrique des feuilles, en Pa;
 R_g - rayonnement global, en $W \text{ m}^{-2}$;
 $e_{s(T)} - e_{a(T)}$ - déficit de saturation de l'air, en kPa ;
 e_a - pression actuelle de vapeur d'eau dans l'air, en kPa ;
 $e_{s(T)}$ - pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface T, en kPa ;
T - température de l'air, en °C ;
 R_{CC} - réserve du sol à la capacité au champ, en mm ;
R - réserve en eau du sol, en mm.

La résistance stomatique dépend de la **résistance stomatique minimale** ($r_{st-\text{min}}$), valeur remarquable correspondant à une situation de non contrainte hydrique (sol et plante).

La résistance stomatique minimale ($r_{st-\text{min}}$) évolue dans le temps, de l'apparition de la feuille jusqu'à sa mort, elle décroît jusqu'à une valeur minimale pour ensuite réaugmenter (évolution biologique et physiologique de la feuille), ce que j'ai observé sur les espèces que j'ai étudiées.

Chez les espèces caducifoliées (chêne, *Acacia*, hévée) toutes les feuilles du couvert évoluant *grosso modo* de façon synchrone, la résistance du couvert est une fonction de la résistance stomatique minimale et de l'indice foliaire.

Chez les espèces persistantes (Eucalyptus), le degré de dépendance de la résistance du couvert à la résistance stomatique minimale dépendra du taux du renouvellement des feuilles puisque coexistent dans le couvert des feuilles d'âges différents (problématique d'échantillonnage).

Relation [résistance stomatique minimale - indice foliaire] chez les espèces caducifoliées: à l'exception d'Eucalyptus, les espèces que j'ai étudiées sont caducifoliées, la période sans feuille étant la saison froide en zone tempérée et la saison sèche en zone tropicale.

J'ai pu ainsi analyser les phénomènes suivants: lors de la mise en place du couvert la résistance stomatique minimale d'une feuille décroît avec l'augmentation de l'indice foliaire et continue généralement de décroître jusqu'à sa valeur minimale alors que l'indice foliaire est maximal.

Ainsi, chez *Quercus petraea* pour LAI=8 %, $r_{st-\text{min}}=8,7 \pm 3,6 \text{ s cm}^{-1}$ et pour LAI=100 % on a $r_{st-\text{min}}=3$ (valeur minimale) égale à $3,6 \pm 0,9 \text{ s cm}^{-1}$.

La période (LAI_{max} – valeurs minimale de r_{st-min}) est plus ou moins longue en fonction de l'espèce; par exemple chez le chêne, elle est très courte (deux à trois semaine).

Ensuite, la r_{st-min} réaugmente pendant toute la période du LAI_{max} (deux mois et demi pour le chêne) pour continuer d'augmenter lors de la sénescence.

- Pour estimer **la résistance du couvert**, on a commencé historiquement par supposer que toutes les feuilles étaient semblables (mêmes caractéristiques physiologiques, même microclimat) et qu'ainsi (**DIAPO n°16**):

$$gc = gst \cdot LAI \quad \text{ou} \quad rc = \frac{rst}{LAI}$$

Avec:

r_{st} - résistance stomatique d'une feuille, en $s \text{ cm}^{-1}$;
 r_c - résistance du couvert, en $s \text{ cm}^{-1}$;
 LAI - indice foliaire du couvert.

- En 1985 Katerji et Perrier ont estimé la variabilité des résistances stomatiques dans l'ensemble du couvert et divisent le couvert en plusieurs strates auxquelles ils appliquent l'équation citée plus haut.
- Saugier et Katerji proposent un calcul reposant sur la décroissance exponentielle du rayonnement avec l'indice foliaire cumulé à partir du sommet du couvert et sur l'intégration de la variation de la résistance stomatique avec le rayonnement reçu.
- D'autres auteurs calculent la résistance du couvert r_c , à partir de mesures du flux de chaleur latente (λE) au dessus du couvert par des méthodes micrométéorologiques en inversant l'équation de Penman-Monteith, le couvert végétal fermé est assimilé à une « grande feuille » dont il faut connaître la résistance aérodynamique (**DIAPO n°17**):

$$\frac{rc}{ra} = \left[\left(\left(\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \beta \right) - 1 \right) + (1 + \beta) \right] \cdot \left[\delta a \cdot cp \cdot \frac{(es(Ta) - ea)}{\gamma \cdot (Rn - Gs)} \right]$$

Avec:

r_c - résistance du couvert, en $s \text{ cm}^{-1}$;
 r_a - résistance aérodynamique, en $s \text{ cm}^{-1}$;
 β - rapport de Bowen, sans unité; le rapport de Bowen (β) rend compte de la répartition de l'énergie disponible au niveau d'une surface, c'est le rapport entre chaleur sensible (H) et chaleur latente d'évaporation (λE) (**DIAPO n°18**):

$$\beta = \frac{H}{\lambda E}$$

Le rapport de Bowen peut alors s'écrire (**DIAPO n°19**):

$$\beta = \gamma \cdot \left(\frac{\delta T / \delta z}{\delta e / \delta z} \right) = \gamma \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta e} \right) \quad \text{ou encore s'écrire sous la forme} \quad \beta = \gamma \cdot \left(\frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1} \right)$$

Avec:

T_1 - température de l'air à niveau z_1 au-dessus de la surface du sol ;

T_2 - température de l'air à niveau z_2 au-dessus de la surface du sol ;

e_1 - pression actuelle de vapeur d'eau à la température de l'air T_1 (niveau z_1 , au-dessus de la surface du sol) ;

e_2 - pression actuelle de vapeur d'eau à la température de l'air T_2 (niveau z_2 au-dessus de la surface du sol) ;

ρ_a - densité de l'air, en kg mole^{-1} ;

c_p - chaleur massique de l'air, en $\text{J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ($1,012 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ;

$e_{s(t)} - e_{a(t)}$ - déficit de saturation de l'air, en kPa ;

e_a - pression actuelle de vapeur d'eau dans l'air, en kPa ;

$e_{s(t)}$ - pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface t , en kPa ;

T - température de l'air, en $^\circ\text{C}$.

- J'ai commencé par utiliser le modèle de Jarvis et Stewart puis pour la savane du littoral congolais, l'équation inversée de Penman-Monteith, avec en parallèle des mesures de résistance stomatique et des facteurs du milieu;

Cette dernière approche permet de faire une analyse déterministe de la résistance du couvert (r_c): la mesure de l'indice foliaire s'avère déterminante dans l'estimation de cette résistance.

Les variables climatiques (DIAPO n°20)

Les variables climatiques autres variables difficiles à estimer dans l'équation Penman-Monteith - le déficit de saturation de l'air.

Il doit théoriquement et idéalement être mesuré au dessus de la végétation dans la couche de l'atmosphère constamment modifiée par l'évapotranspiration (couche limite de surface) et diffère alors des valeurs des stations météorologiques (gazon bien arrosé).

Pour exemple, la « couche limite de surface » de la savane congolaise est $Z_H \approx 3,0$ x hauteur du peuplement dans le cas du flux de chaleur sensible, et $Z_{\lambda E} \approx 3,5$ x hauteur du peuplement dans le cas du flux de chaleur latente.

Méthodologiquement, il faut éviter tout effet de « *fetch* » pour que les formules aérodynamiques classiques puissent y être appliquées.

Il existe des modèles pour estimer le déficit de saturation de l'air à partir des caractéristiques de la couche limite planétaire (CLP), couche globale soumise aux échanges d'énergie et de masse de la surface mais non encore soumise à la rotation terrestre (de quelques dizaines de mètres la nuit et jusqu'à 3000 mètres le jour).

Influence de l'indice foliaire du couvert sur l'évapotranspiration réelle (DIAPO n°21)

Le rapport Transpiration/Evapotranspiration potentielle (Tr/ETP) augmente avec l'augmentation de l'indice foliaire suivant une fonction $1-e^{-k \cdot LAI}$ où k représente le coefficient d'extinction de la lumière dans le couvert.

En fonction du type de végétation l'écart à cette courbe est plus ou moins grand.

L'estimation et la modélisation de l'indice foliaire est donc essentiels.

Parmi toutes mes données concernant différents écosystèmes, j'ai choisi deux situations qui rendent compte de l'influence de l'indice foliaire sur l'évapotranspiration réelle: la chênaie tempérée, forêt caduque que j'ai suivie plusieurs années du débourrement jusqu'à la chute des feuilles, et la steppe sahélienne.

Dans le cas **des espèces caducifoliées**, il s'agit de modéliser les différents événements phénologiques:

- le jour de débourrement,
- la période de croissance foliaire jusqu'à indice foliaire maximal,
- la phase adulte pendant laquelle l'indice foliaire $LAI=LAI_{max}$,
- le début de la sénescence, de la chute des feuilles jusqu'à moment où l'indice foliaire s'annule ($LAI=0$).

Avec deux variables d'entrée simples, la température moyenne de l'air et la photopériode, j'ai modélisé pour *Quercus petraea*, le jour du débourrement, celui de la fin d'accroissement en surface des feuilles, l'évolution de l'indice foliaire.

L'évapotranspiration réelle suit les variations de l'indice foliaire dans les forêts caduques; comme il existe un décalage entre le moment où $LAI=LAI_{max}$ et le moment où r_{st-min} atteint sa valeur minimale, l'évapotranspiration réelle atteint son maximum (en période de non contrainte hydrique) après $LAI=LAI_{max}$ au moment où r_{st-min} est à sa valeur minimale, pour le chêne environ un mois après que $LAI=LAI_{max}$.

Perspectives:

- je travaille actuellement sur *Cocus nucifera* pour lequel j'ai des données phénologiques pour trois sites et sur quatre années avec les facteurs climatiques correspondants (2001-2004) (rayonnement global, PAR, températures minimales et maximales, humidité relative de l'air, vitesse du vent, précipitations incidentes).

Le cocotier est une monocotylédone arborescente qui a une biomasse fonctionnelle toute l'année, un cocotier devient adulte au bout de sept ans, avec une durée de vie d'environ 100 ans, chaque feuille a une durée de vie d'environ quatre ans et les phénomènes d'apparition et de disparition des feuilles sont continus.

Je travaille à la modélisation de la mise en place du couvert adulte (sept ans), en reprenant les bases de mon modèle de prévision de la date de débourrement des feuilles du chêne: il s'agit d'un modèle mécaniste puisqu'il n'est asservi à aucune date qui correspondrait à un temps $t=0$ des phénomènes étudiés, qu'il y a débourrement lorsque la somme des températures pendant une période (dont la durée dépend de l'espèce) précédant le jour du débourrement est supérieure à une fonction décroissante de la durée du jour.

- j'ai le projet d'utiliser des données personnelles non encore traitées concernant *Balanites aegyptiaca*: c'est une espèce qui a des feuilles et des tiges (épines) photosynthétiques, la chute des feuilles a lieu lors de la saison sèche, la mise en place des feuilles lors de la saison suivante s'effectue avant l'arrivée des pluies, lors de la période où l'humidité relative de l'air réaugmente (dans le Ferlo, au Sénégal, environ 10 à 20 jours avant l'arrivée du front intertropical - FIT).

La modélisation du débourrement et de la mise en place de l'indice foliaire utiliserait ici vraisemblablement la température, la photopériode et l'état hydrique de l'atmosphère.

Balanites aegyptiaca offre un exemple **d'adaptation à la sécheresse** et je vais récapituler ici l'ensemble de ses caractéristiques qui expliqueraient sa répartition (espèce qui « remonte » le plus au Nord du Sénégal) et l'augmentation actuelle de sa fréquence par rapport aux autres espèces arbustives et arborescentes de la steppe sahélienne: en saison sèche, lorsque la disponibilité en eau devient limitante, on a vu que *Balanites aegyptiaca* avait une stratégie de maintien d'un potentiel foliaire élevé avec augmentation de la résistance stomatique (« message d'ABA » issu des racines) et une stratégie de modification de l'indice foliaire (chute des feuilles).

Ainsi, en fin de saison sèche alors que *Balanites aegyptiaca* n'a plus de feuilles il subsiste dans les horizons profonds une lame d'eau qui était disponible pour *Balanites aegyptiaca* mais qui n'a pas été utilisée (augmentation de la résistance stomatique, diminution de la transpiration).

Ensuite avant les pluies, il y a débourrement et croissance foliaire pendant la période où l'humidité relative de l'air réaugmente, cette croissance foliaire est possible puisqu'il y a de l'eau disponible en profondeur.

Une telle situation nous amène à faire deux suppositions:

(1^e) supposer l'existence d'un « message » chimique lié à la détection de l'augmentation de l'humidité relative de l'air, message participant à l'équilibre chimique de l'induction au débourrement.

Cette détection doit être le fait d'un organe aérien qui pourrait être les tiges (épines) photosynthétiques, qui elles, restent en place.

(2^e) supposer que ce « message » est prioritaire par rapport au « message ABA » issu des racines puisque les feuilles se mettent en place alors que les horizons supérieurs sont au point de flétrissement permanent, dans une « configuration sol » identique à celle de la fin de la saison sèche.

Tout ce qui précède concerne les **couverts fermés** physiologiquement **homogènes** (étant entendu qu'on travaille sur des végétations floristiquement homogènes).

Il existe de nombreux types de physiologie, du couvert fermé – physiologiquement homogène ou non homogène – au couvert ouvert (présence de zones de sol nu) physiologiquement homogène ou non homogène.

Shuttleworth et Wallace ont mis au point un modèle pour des **végétations éparées**, des végétations peu denses et homogènes comme une plantation d'arbres avec sol nu ou une culture maraîchère avec sol nu, modèle dans lequel la végétation est considérée comme une première strate et le sol comme une deuxième strate.

Ils ont repris l'équation de Penman-Monteith en l'appliquant à chaque strate avec des valeurs de rayonnement net et de déficit de saturation propres à chacune.

L'évapotranspiration réelle dépend peu de l'indice foliaire en conditions hydriques non limitantes (l'évaporation d'un sol nu est proche de l'évapotranspiration réelle d'une végétation fermée) mais augmente avec l'indice foliaire en conditions hydriques limitantes: le sol transmet à la végétation une partie de l'énergie du rayonnement qu'il a absorbé, énergie utilisée pour la transpiration.

La **steppe** sahélienne que j'ai étudiée est une végétation constituée de deux entités floristiques et physiologiques: pendant la saison des pluies, un couvert herbacé (une espèce annuelle dominante) et des bosquets d'arbres et arbustes (*Acacia* et *Balanites*).

Pendant la saison sèche le couvert herbacé va progressivement disparaître jusqu'au sol nu.

Ce type de végétation pose les problèmes liés, de l'échelle spatiale à laquelle les phénomènes sont appréhendés, des techniques employées et de la résolution théorique choisie.

La modélisation de l'évapotranspiration réelle de ce type de végétation est un des grands axes de recherche actuels : alors que pour une végétation fermée homogène, il est facile d'éviter les zones où il y a transferts horizontaux d'énergie et de masse, dans ce type de végétation, les bosquets ont une surface telle que ces transferts horizontaux (entre bosquet et zone herbacée) sont un phénomène majeur, phénomène que j'ai « occulté » en traitant séparément les zones herbacées et les bosquets (saison avec herbes) et les zones de sol nu et les bosquets (saison sans herbes) et ce, avec deux types de bosquets, bosquets à *Acacia* et bosquets à *Balanites* puisque les deux espèces n'ont pas les mêmes stratégies d'utilisation de l'eau: équation du

bilan hydrique, équation de Penman-Monteith pour trois catégories théoriquement homogènes de végétation (la 1^e herbacée ou sol nu, la 2^e arbustive à *Acacia*, la 3^e arbustive à *Balanites*) puis pondération avec le pourcentage de recouvrement respectif de la surface en bosquet (ici 20 %) et de la surface herbacée ou sol nu (ici 80 %).

Avec un recouvrement de 20 % pour les bosquets j'ai supposé que l'erreur commise sur l'estimation de l'évapotranspiration réelle de la steppe était faible, mais pour que je teste cette méthode de calcul il m'aurait fallu avoir au moins deux cas de figure avec un pourcentage de recouvrement en bosquets différent, 20 % et par exemple 50 %.

J'ai pu quantifier que l'évapotranspiration réelle suit les variations d'indice foliaire.

Perspectives:

- Dans une telle configuration de végétation, en sus des méthodes déjà utilisées, la méthode du flux de sève (transpiration individu par individu des arbres et arbustes) permettrait d'affiner la contribution des arbres et arbustes à l'évapotranspiration réelle de la steppe.
- La méthode des corrélations turbulentes qui intègre tout type de transfert d'énergie est la méthode particulièrement adaptée à ce type de végétation: les bosquets sont de surface variable, la surface maximale d'un bosquet est d'environ 100 m²; ces bosquets sont répartis de façon assez homogène et sont distants en moyenne d'environ 50 m. On peut imaginer découper la steppe en mailles de 50 m sur 50 m, la maille intégrant un bosquet au dessus duquel serait montée la tour de mesure.

Incidence de la modification des couverts sur l'évapotranspiration (DIAPO n°22)

L'homme a modifié et continue de modifier les couverts végétaux;

Globalement il y a augmentation des surfaces herbacées et de sol nu au détriment des surfaces peuplées d'arbres et arbustes depuis le néolithique.

Les modifications du couvert végétal participent à l'évolution des climats locaux, des climats régionaux et du climat global terrestre.

Les modèles climatiques de circulation générale de l'atmosphère nécessitent des modèles d'évapotranspiration réelle rendant compte des échanges végétation – atmosphère les plus réalistes possibles.

Mon étude au Sénégal de la steppe à *Acacia raddiana* et à *Balanites aegyptiaca* et mon étude au Congo de la savane à *Loudetia arundinacea* et des plantations d'Eucalyptus sur le littoral offrent deux exemples de l'incidence d'une modification du couvert sur l'évapotranspiration réelle: au Sénégal, les bosquets de la steppe (20 % de la surface) peuvent être assimilés à ce

qu'était la forêt claire à *Acacia senegal* du Nord du Sénégal avant que cette forêt ne disparaisse et les 80 % de surface herbacée représente le nouvel écosystème.

Au Congo, sur le littoral, il existe des lambeaux de savane pure jouxtant les forêts d'Eucalyptus plantées sur cette savane d'origine.

Le remplacement de la forêt par un écosystème herbacé augmente le drainage et diminue l'évapotranspiration réelle sur un cycle complet de végétation (avec des variations saisonnières qui peuvent être marquées puisqu'en saison de déficit hydrique les deux écosystèmes se différencient moins qu'en saison humide où l'évaporation de l'eau interceptée est plus grande pour la forêt à cause de sa forte rugosité).

La conductance de surface des deux couverts diffère peu, ce qui diffère, c'est conductance aérodynamique (g_a) pour laquelle il existe un facteur 2 entre les deux couverts (de $2,5 \text{ cm s}^{-1}$ à $5,0 \text{ cm s}^{-1}$ pour « l'herbacé » et de $5,0 \text{ cm s}^{-1}$ à $10,0 \text{ cm s}^{-1}$ pour le « forestier »).

Les deux couverts se différencient par leur albédo (supérieure pour l'écosystème herbacé) et leur bilan énergétique (inférieur pour l'écosystème herbacé), l'évapotranspiration réelle d'un écosystème herbacé dépendra surtout du rayonnement net et l'évapotranspiration réelle d'une forêt du déficit de saturation de l'air.

Le sol joue un rôle d'importance majeure: l'état de surface du sol va contrôler l'existence (ou l'absence) de ruissellement dû à la présence (ou à l'absence) d'une croûte dans des écosystèmes herbacés à faible recouvrement.

Dans la steppe à *Acacia raddiana*,

- la 1^e année, après la mise en défends de la parcelle expérimentale, il y a eu constitution d'une croûte et non renouvellement de la strate herbacée car cette surface n'était plus piétinée par les troupeaux;
- le 2^e année un sarclément a remplacé le piétinement animal.

La conductivité hydraulique du sol saturé va aussi contrôler l'existence (ou l'absence) d'un ruissellement; cette variable est dans l'ensemble plus faible dans les écosystèmes herbacés souvent soumis au piétinement animal que dans les forêts.

La profondeur du sol exploitée par les racines des arbres est généralement supérieure à celle exploitée par les racines des herbes: il subsiste dans le sol de la steppe à *Acacia raddiana* une lame d'eau disponible qui pourrait être utilisée si la steppe était boisée.

En 1997 Lean et Rowntree donnent un exemple de remplacement d'une forêt (forêt amazonienne) par une prairie, exemple pour lequel la diminution de la profondeur du sol exploitée n'affecte que peu le bilan hydrique: dans le cas de la forêt amazonienne, il existe des régions où le sol potentiellement exploitable par les racines est peu profond (existence d'un horizon imperméable aux racines), on se retrouve dans le cas d'une forêt qui ne dispose que d'une faible « réserve utile » comparable à celle de la prairie qui lui succède et dont le sol présente souvent une circulation hydrique souterraine importante.

On voit ici l'importance du sol dans un bilan hydrique régional.

Dans les modèles climatiques globaux, le fonctionnement de la circulation générale de l'atmosphère est intimement lié à la distribution planétaire des sources et des puits d'énergie;

Lors des équilibres, le transport s'effectue par l'air atmosphérique et l'eau des océans.

L'atmosphère doit ainsi transporter de l'énergie des continents vers les océans pendant l'été et des océans vers les continents pendant l'hiver.

L'étude de ces phénomènes sur les continents utilise les données relatives aux études d'évapotranspiration réelle à un niveau local et régional, niveau qui est le mien.

Conclusion (DIAPO n°23)

Les modèles récents d'évapotranspiration réelle d'un couvert dissocient évaporation du sol, transpiration du végétal et interception, simulent l'évolution de la structure du couvert, des résistances stomatiques, ensembles de facteurs qui contrôlent les résistances aux transferts de vapeur d'eau et qui régissent l'équilibre entre évaporation et transpiration.

Aujourd'hui pour les modèles à vocation mécaniste, se pose le problème du choix des paramètres d'entrée les plus significatifs et le problème de leur calage initial dans des conditions environnementales données.

Actuellement d'un point de vue méthodologique, pour les espèces arbustives/arborescentes, l'estimation de la transpiration individu par individu (flux de sève) ouvre des perspectives nouvelles.

Nous finirons en disant que parallèlement au travail de modélisation, le travail de terrain est loin d'être achevé: ainsi de la résistance stomatique minimale pour laquelle j'ai montré qu'il existait pour *Quercus petraea* un facteur trois entre sa valeur minimale et sa valeur maximale ou encore de la gamme que l'on peut supposer très étendue des caractéristiques d'adaptation à la sécheresse telles que celle décrites pour *Balanites aegyptiaca*.

Je vous remercie de votre attention