

## **Institut de Recherche pour le Développement IRD**

---

### **« Modélisation des systèmes sol-plante-atmosphère, instrumentation »**

---

Séminaire de formation en Pédologie Hydrostructurale: Méthodologies de caractérisation et modélisation hydrostructurale du sol pour la gestion des eaux et des sols en agriculture irriguée de précision

**Du 28 novembre au 3 décembre 2011**

---

**JERZY J. NIZINSKI, ERIC BRAUDEAU, JEAN-PIERRE MONTOROI & MARC  
LOINTIER**

Institut de Recherche pour le Développement – I.R.D., UMR 211 « BIOEMCO - Biogéochimie et écologie des milieux continentaux », Centre d'Ile de France, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

## **PROGRAMME**

### **Lundi 28 novembre 2011**

09h00 - 10h00 : Ouverture du séminaire : présentation du programme, son objectif et les attentes  
10h00 - 11h30 : Pédologie hydrostructurale : théorie et concepts - E. Braudeau  
11h30 - 12h00 : Pause café  
12h00 - 13h00 : Présentation des invités  
13h 00 - 14h00 : Pédologie hydrostructurale : perspectives et discussion - E. Braudeau et H. Boukcim

### **Mardi 29 novembre 2011**

09h00 - 9h45 : Télédétection - M. Lointier  
09h45 - 10h30 : Géophysique de subsurface appliquée à la cartographie - J.-P. Montoroi  
10h30 - 11h30 : Modélisation des systèmes sol-plante-atmosphère, instrumentation - G. Nizinski  
11h30 - 12h00 : Pause café  
12h00 - 14h00 : Présentation des invités et discussion

### **Mercredi 30 novembre 2011**

09h00 - 10h00 : Cartographie et système d'information à référence spatiale de l'organisation des sols (SIRS-Sol, Direction des Sols) - Ch. Derouich et A. Loukil  
10h00 - 11h00 : Caractérisation et modélisation des transferts d'eau et de sels en milieu semi-aride tunisien - S. Kanzari et M. Hachicha  
11h00 - 11h30 : Pause café  
11h30 - 12h30 : Aperçu sur Le laboratoire de caractérisation hydrostructurale des sols et quelques applications en Tunisie - Ch. Zidi, M. Hachicha et H. Hamrouni  
12h30- 14h00 : Visite du laboratoire de caractérisation hydrostructurale des sols - Direction des sols- Ch. Zidi, M. Hachicha et H. Hamrouni

### **Jeudi 1 décembre 2011**

09h00 - 14h00 : Sortie de terrain dans la Basse Vallée de la Mejerdah - M. Hachicha  
Exemples d'aménagement, de la gestion et du suivi d'un périmètre irrigué affecté par la salinité et l'hydromorphie (Périmètre de Cebala) : relation laboratoire-terrain pour la modélisation et la gestion des systèmes irrigués (expérimentation, instruments de mesure et suivi des eaux et des sols)

### **Vendredi 2 décembre 2011**

09h00 - 10h30 : Modélisation du système sol-structure-eau (modèle Kamel®) : principe et cadre d'utilisation - E. Braudeau  
10h30 - 11h00 : Pause café  
11h00 - 14h00 : Initiation au modèle Kamel® - P. Join (Sté Valhoriz)

### **Samedi 3 décembre 2011**

09h00 - 11h00 : Table ronde : synthèse, évaluation et perspectives  
11h00 - 11h30 : Pause café  
11h30 - 12h00 : Clôture

## LISTE DES PUBLICATIONS RELATIVES A LA MODELISATION DU SYSTEME SOL-PLANTE-ATMOSPHERE

1. Nizinski J.J., Galat-Luong A. & Galat G., 2012a. Etude de la conductivité-hydraulique des troncs d'hévéa: cas d'une plantation en Côte d'Ivoire (1<sup>ère</sup> partie – Méthodes). *Geographia Technica*, n°1 – mars (sous presse)
2. Nizinski J.J., Galat-Luong A. & Galat G., 2012b. Etude de la conductivité hydraulique des troncs d'hévéa : cas d'une plantation en Côte d'Ivoire (2<sup>ème</sup> partie – Résultats). *Geographia Technica*, n°2 – octobre (sous presse)
3. Nizinski J.J., Galat G. & Galat-Luong A., 2012. Actual evapotranspiration and canopy resistance measurement of the savannah in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). *Arid Ecosystems - Aridnye Ekosistemy* (sous presse)
4. Galat G., Galat-Luong A. & Nizinski J.J., 2012. Is Lord Derby's Eland, the world's largest antelope, able to adapt its diet if dryness? *Animal biology*, n°1 (sous presse)
5. Nizinski J.J., Galat G. & Galat-Luong A., 2011. Bioclimatological analysis of the bark necrotic rubber tree in Côte d'Ivoire plantations. *Russian Agricultural Sciences*, n°37. vol. 1, 58-67
6. Nizinski J.J., Galat G. & Galat-Luong A., 2011. Water balance and sustainability of Eucalyptus plantations in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). *Russian Journal of Ecology - Ekologiya*, vol. 42, n°2 36-42
7. Nizinski J.J., Galat-Luong A., Galat G. & Lhomme J.P., 2010. L'intérêt de l'utilisation *in situ* des sondes psychrométriques de Dixon-Tyree: cas d'une plantation d'hévéa en Côte d'Ivoire. *Climatologie*, vol. 7, 108-121
8. Nizinski J.J., Galat-Luong A., Galat G., Dingkuhn M. & Fabre D., 2009. Evapotranspiration réelle et résistance du couvert d'une savane à *Loudetia arundinacea* (bassin du Kouilou, Congo-Brazzaville). *Climatologie*, vol. 6, 33-45
9. Nizinski J.J., Galat-Luong A. & Galat G., 2009. Aspects bioclimatiques de nécrose corticale de l'hévéa. *Geographia Technica*, 355-360
10. Galat G., Galat-Luong A. & Nizinski J.J., 2009. L'impact du changement climatique sur les variations des populations de grands vertébrés à leur extrême limite de répartition est-il fonction de leurs régimes alimentaires? *Geographia Technica*, 205-210
11. Galat-Luong A., Galat G. & Nizinski J.J., 2009. En extrême limite nord de répartition, le réchauffement climatique a conduit les chimpanzés à filtrer leur eau de boisson. *Geographia Technica*, 199-204
12. Galat G., Galat-Luong A. & Nizinski J.J., 2009. Increasing dryness and regression of the distribution area of the Northern most Western red colobus *Procolobus badius temminckii*. *Mammalia*, n° 73, 365-368
13. Nizinski J.J., Morand D., Loumeto J.-J., Galat-Luong A. & Galat G., 2008. Bilan hydrique comparé d'une savane et d'une plantation dans le bassin du Kouilou (Congo-Brazzaville). *Climatologie*, vol. 5, 99-112
14. Deans J.D., Edmunds W.M., Lindley D.K., Gaye C.B., Dreyfus B., Nizinski J.J., Neyra M. & Munro R.C., 2004. Nitrogen in interstitial waters in the Sahel: Pollutant or resource. *Plant and Soil*, 3, 1-16
15. Deans J.D., Diagne O., Nizinski J.J., Lindley D.K., Seck M., Ingleby K. & Munro R.C., 2002. Comparative growth, biomass production, nutrient use and soil amelioration by nitrogen-fixing tree species in semi-arid Senegal. *Forest Ecology and Management*, vol. 176, 253-264
16. Nizinski J.J., Loumeto J.J., Ayoma M.-B., Mabilia-N'goma A. & Nsemi R.N., 2002. Evapotranspiration réelle de la plantation d'Eucalyptus (bassin du Kouilou, Congo). *Annales de l'Université de Marien Ngouabi (Congo-Brazzaville)*, n° 3(1), 59-71
17. Nizinski J.J., Loumeto J.J., Ayoma M.-B., Mabilia-N'goma A. & Nsemi R.N., 2001. Durabilité de plantations d'Eucalyptus dans le bassin du Kouilou (Congo). *Le Flamboyant*, n° 54, 14-17
18. Laclau J.-P., Bouillet J.-P., Nizinski J.J. & Nzila J.-D., 1999. Etude de l'impact de la plantation d'Eucalyptus sur la fertilité des sols de savane autour de Pointe-Noire (Congo). *Le Flamboyant*, n°39, 26-28
19. Nizinski J.J., Morand D. & Fournier Ch., 1994. Actual evapotranspiration of a thorn scrub with *Acacia tortilis* and *Balanites aegyptiaca* (North Senegal). *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 69, n°5, 93-111
20. Berger A., Fournier Ch., Nizinski J.J. & Grouzis M., 1993. Deux ans de suivi *in situ* de la contrainte hydrique sur *Acacia raddiana* et *Acacia senegal*. *Bois & Forêts des Tropiques*, vol. 238, n° 4, 21-34
21. Nizinski J.J., Morand D. & Fournier Ch., 1992. Le rôle du couvert ligneux sur le bilan hydrique d'une steppe (Nord du Sénégal). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol. XXVII, n°2, 225-236
22. Dayau S., Valancogne Ch., Morand D. & Nizinski J.J., 1992. Note technique - Estimation du flux de sève du kiwi par bilan de chaleur en conditions semi-contrôlées. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol. XXVII, n° 2, 375-381
23. Nizinski J.J. & Saugier B., 1989. Dynamique de l'eau sous chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) en forêt de Fontainebleau. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 46, n° 2, 173-186
24. Nizinski J.J. & Saugier B., 1989. A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 47, 1-17
25. Nizinski J.J., Morand D. & Saugier B., 1989. Variation of stomatal resistance with leaf age in *Quercus petraea*: Effect on the soil-water balance of an oak forest. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 46 suppl., 429s-432s
26. Nizinski J.J., Morand D. & Saugier B., 1989. Modélisation du bilan de l'eau d'une forêt. Application à une futaie de chênes. *Bulletin d'Ecologie*, vol. 20, n° 1, 69-72
27. Morand D., Nizinski J.J. & Saugier B., 1989. Adaptation au niveau de disponibilité en azote, en peuplements herbacés. Deux exemples: *Anthoxanthum odoratum* L. et *Arrhenatherum elatius* J. et C. ex Presl var. *vulgare* Koch. *Bulletin d'Ecologie*, vol. 20, n° 1, 73-75
28. Morand D. & Nizinski J.J., 1989. L'intérêt phytothérapeutique de l'arbre à thé (*Melaleuca alternifolia*). *La Lettre Phytothérapeutique du Pharmacien*, 9, 4-10
29. Nizinski J.J. & Saugier B., 1988. A model of leaf budding and development for a mature *Quercus* forest. *Journal of Applied Ecology*, vol. 25, n° 2, 643-652
30. Nizinski J.J. & Saugier B., 1988. Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Acta Oecologica/Oecologia Plantarum*, vol. 9/23, n° 3, 311-329
31. Nizinski J.J., 1987. Résumé de la thèse. *Bulletin d'Ecologie*, vol. 18, n° 1, 73-75
32. Saugier B., Halldin S., Pontailier J.-Y. & Nizinski J.J., 1985. Bilan hydrique de forêts de chênes et de hêtres à Fontainebleau. Mesures et modélisation. *Revue du Palais de la Découverte*, vol. 13, n° 130, 187-200

## **Ce dossier contient:**

- 1. INTRODUCTION - DOMAINE D'ETUDE DE LA BIOCLIMATOLOGIE.....4**
- 2. MODELISATION DES SYSTEMES SOL-PLANTE-ATMOSPHERE...7**
- 3. CARTOGRAPHIER LA PRODUCTION VEGETALE.....9**
- 4. CLIMATS, FORMATIONS VEGETALES ET ENVIRONNEMENT PHYSIQUE.....11**
- 5. APPROCHE GENERALE DE LA CROISSANCE.....19**
- 6. PHOTOSYNTHESE ET MESURES DE PHOTOSYNTHESE.....23**
- 7. BILAN HYDRIQUE COMPARE D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS DANS LE BASSIN DU KOUILOU (REPUBLIQUE POPULAIRE DU CONGO).....28**
- 8. ÉTUDE ET MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VEGETAUX: CAS D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION.....42**
- 9. EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET RESISTANCE DU COUVERT D'UNE SAVANE A *LOUDETIA ARUNDINACEA* (BASSIN DU KOUILOU, CONGO-BRAZZAVILLE).....52**
- 10. MODELISATION DU BILAN DE L'EAU D'UNE FORET. APPLICATION A UNE FUTAIE DE CHENES .....84**

## 1. INTRODUCTION - DOMAINE D'ETUDE DE LA BIOCLIMATOLOGIE

Les conceptions actuelles de ce cycle de l'eau reposent sur l'appréciation du fait que le champ (ou la station) et ses composantes – le sol, la plante, l'atmosphère – constituent une entité physique dynamique dans laquelle les processus de circulation de l'eau sont interdépendants comme les maillons d'une chaîne.

Dans ce système unifié appelé SPAC (Sol – Plante – Atmosphère – Continuum) par Philip (1966)<sup>1</sup>, la circulation de l'eau se fait d'un niveau d'énergie potentielle élevé vers un autre moins élevé, si on admet que le concept de « potentiel de l'eau » est applicable au sol, à la plante et à l'atmosphère.

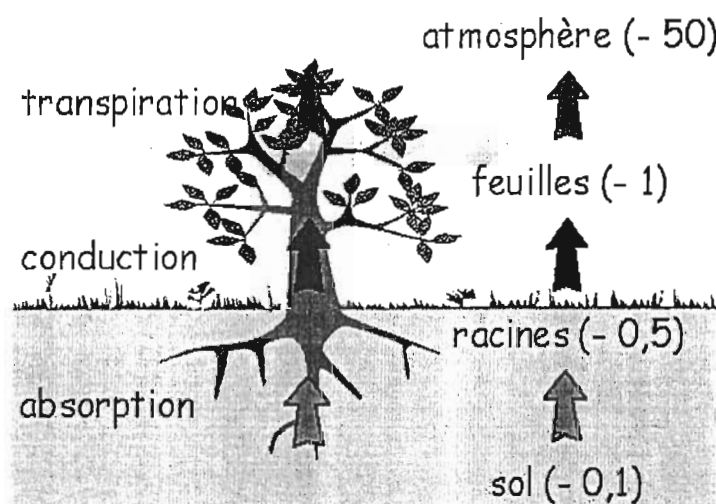


Figure n°1 – Système unifié appelé « Sol – Plante – Atmosphère – Continuum », la circulation de l'eau se fait d'un niveau d'énergie potentielle élevé ( $\Psi_{\text{sol}} = -0,1$  bars) vers un autre moins élevé ( $\Psi_{\text{atmosphère}} = -50$  bars).

Ainsi, la circulation de l'eau comprend le mouvement de l'eau du sol vers les racines, l'absorption par les racines, le transport des racines vers les branches et à travers le xylème jusqu'aux feuilles, l'évaporation dans les cavités intercellulaires des feuilles, la diffusion de la vapeur d'eau à travers les stomates vers la couche d'air calme au niveau de la feuille et à travers la couche d'air turbulente à partir de laquelle la vapeur d'eau diffuse dans l'atmosphère extérieure.

La bioclimatologie se situe donc au carrefour de plusieurs disciplines: la physique de l'eau du sol (étude du sous-système « Sol »), l'écophysiologie végétale (sous-système « Plante »), la micro météorologie (sous-système « Atmosphère ») et la climatologie.

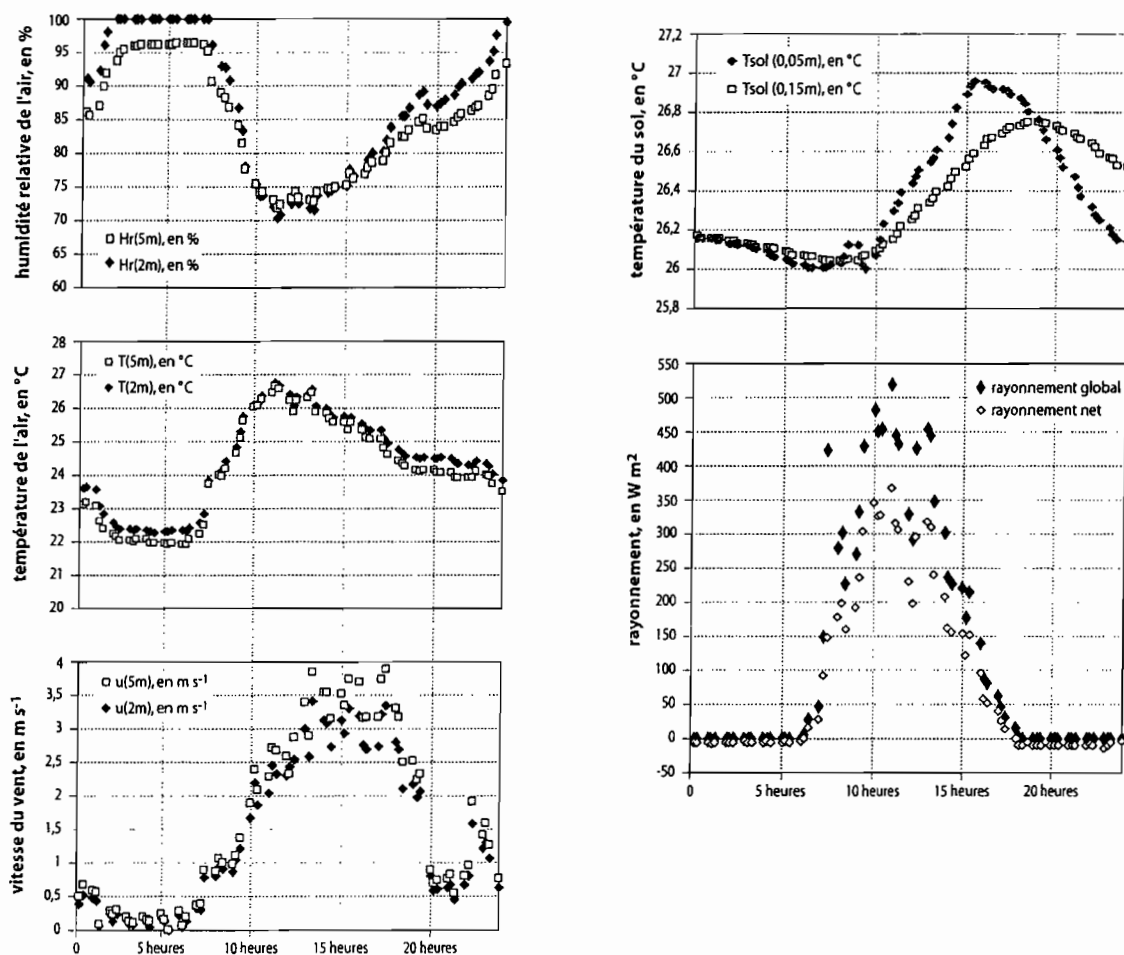
Cette dernière utilise les données bio-climatologiques dans l'étude et dans la modélisation de la circulation générale de l'atmosphère. L'atmosphère est l'un

<sup>1</sup> Philip J.R., 1966. Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology*, 28, 71-88

des systèmes étudiés par la climatologie, avec les trois autres systèmes que sont les océans, les continents et la cryosphère.

C'est sur les continents, à proximité de la surface du sol, qu'ont lieu des phénomènes essentiels dans le déterminisme du climat (rayonnement, évapotranspiration). Les continents sont le siège de phénomènes de transfert de masse (vapeur d'eau) et d'énergie (chaleur latente d'évaporation) qui sont objets d'étude de la bioclimatologie. La micro-météorologie établit, entre autres objets d'étude, les profils verticaux des caractéristiques de l'état de l'atmosphère (température, humidité de l'air, vent...) dans la couche limite de surface (de 0 à 30 m au dessus du sol); c'est dans cette couche que la variabilité (dans l'espace et dans le temps) de ces caractéristiques est la plus prononcée.

**Figure n°2** – Evolution au cours de la journée du 29 septembre 1998 (a) de la température moyenne de l'air ( $T_{air}$ ), de l'humidité relative de l'air (Hr), de la vitesse du vent ( $u$ ) à 2,0 et 5,0 m au-dessus de la surface du sol de la savane ; (b) de la température du sol à 0,05 et 0,15 m de profondeur, du rayonnement global ( $R_g$ ) et rayonnement net ( $R_n$ ) à 6,0 m au dessus de la surface du sol de la savane (Nizinski et al. 2009<sup>2</sup>).



<sup>2</sup> Nizinski J.J., Galat-Luong A., Galat G., Dingkuhn M. & Fabre D., 2009. Evapotranspiration réelle et résistance du couvert d'une savane à *Loudetia arundinacea* (bassin du Kouilou, Congo-Brazzaville). *Climatologie*, vol. 6, 33-45

L'étude des phénomènes physiques qui interviennent dans les trois sous systèmes (sol – plante - atmosphère) et qui se déroulent simultanément à des « régimes différents » pose le problème des différentes échelles d'espace et de temps en bioclimatologie: il convient de distinguer l'échelle phénoménologique (les processus réels) et les échelles imposées par les méthodes de mesure et par la modélisation.

Les phénomènes étudiés le sont du niveau de la feuille à celui de l'individu, de l'ensemble des individus d'un peuplement jusqu'à l'échelle régionale. Les échelles de temps des phénomènes mesurés vont de la seconde (bilan énergétique) à quelques jours (modification de l'indice foliaire) à la semaine ou plus (teneur en eau du sol, absorption racinaire).

Une autre caractéristique qui se rencontre dans tout essai de compréhension mécaniste d'un système complexe est le fait que l'on ne dispose pas encore de méthode expérimentale pour appréhender certains phénomènes, ainsi la mesure des gradients et flux microscopiques de l'eau au voisinage immédiat des racines (les méthodes de mesure de la teneur en eau du sol et du potentiel hydrique du sol reposent sur la détection d'un volume de sol relativement grand qui englobe ces micro-gradients).

Nous abordons les grandes problématiques de cette discipline:

- le déterminisme du flux d'eau dans le système SPAC, les systèmes de régulation de ce flux (modèles phénologiques, modèles de régulation stomatique, d'absorption racinaire).
- l'incidence de la modification des couverts sur l'évapotranspiration (déboisement et reboisement) et sur le climat régional.
- l'impact de la contrainte climatique (hydrique et énergétique) sur la production végétale.

Pour illustrer nos propos, nous vous proposons les résultats obtenus dans des écosystèmes de physionomie différentes: des couverts fermés herbacés (savane), des couverts fermés arborescents (forêts), des couverts fermés non homogènes (savane arbustive avec zone herbacée et bosquets arbustifs et arborescents disséminés) assimilés actuellement, pour la modélisation, à une végétation épars (recouvrement du sol par la végétation non complet).

Nous avons travaillé dans des climats différents: la zone tempérée (forêt de chênes), la zone tropicale humide (forêt tropicale humide en Guyane française; plantations d'*Eucalyptus* et savane au Congo; plantations d'hévéas au Ghana et en Côte d'Ivoire) et la zone subtropicale sèche (savane boisée du nord du Sénégal).

Nous aborderons le cycle de l'eau à l'échelle régionale, problématique qui débouche sur les études des changements globaux.

## **2. MODELISATION DES SYSTEMES SOL-PLANTE-ATMOSPHERE (de Parcevaux & Huber, 2007<sup>3</sup>)**

L'étude de tout système complexe dans les conditions naturelles exige la formulation et la mise en œuvre d'hypothèses, et la description quantitative des fonctions du système.

La modélisation consiste à élaborer un agencement précis de ces hypothèses.

Les modèles servent à coordonner un grand nombre d'observations d'une façon concise. La modélisation est une démarche classique de la recherche et elle existait implicitement avant l'utilisation explosive relativement récente et quelque peu abusive de ce terme dans les sciences biologiques; un chercheur qui travaille sur de nombreux modèles en faisant peu ou pas d'expériences peut paraître, grâce à cette mode nouvelle, plus sérieux que celui qui sait observer les phénomènes naturels et obtenir de bons résultats expérimentaux. La vérité est dans un bon équilibre entre toutes les composantes de la démarche scientifique. En bioclimatologie la modélisation est une technique habituelle.

Les modèles peuvent aider à identifier les domaines où les connaissances manquent et où de nouvelles observations et expériences sont nécessaires. Ils peuvent aussi servir à prédire le comportement d'un système dans un domaine non expérimenté; il s'agit alors de simulation.

Les modèles peuvent faire appel à des formulations mathématiques, cas le plus courant, ou à d'autres phénomènes, généralement de nature physique, qui se comportent de façon analogue au phénomène étudié. Les premiers sont des modèles mathématiques, comme la relation liant la photosynthèse d'un végétal au rayonnement absorbé, et les seconds des modèles analogiques, comme utilisation de circuits électriques pour rendre compte de la diffusion ou d'autres processus de transport de diverses molécules.

Les modèles mathématiques sont empiriques, s'ils ne visent pas à décrire les mécanismes impliqués et qu'une information minimale est utilisée *a priori* dans leur développement. C'est le cas des modèles qui utilisent les techniques de régression statistique pour décrire et prédire les variations de telle ou telle

---

<sup>3</sup> De Parcevaux S. & Huber L., 2007. Bioclimatologie: concept et applications. Editions Quae, INRA, Versailles, 336 pages

caractéristique des cultures en fonction des variations des conditions météorologiques d'une année à l'autre.

Les modèles mathématiques sont mécanistes, s'ils font appel au maximum aux connaissances antérieures et utilisent au mieux l'explication des phénomènes à des niveaux plus fins d'organisation.

Les modèles peuvent aussi être déterministes ou stochastiques:

- Dans un modèle déterministe, la sortie est complètement définie lorsque les entrées sont connues ;
- Un modèle stochastique introduit un élément de hasard comme une donnée du modèle; c'est le cas des modèles utilisant la simulation de séquences de types de temps, la pénétration de la lumière dans un couvert végétal ou la dispersion de spores de champignons pathogènes.

Les modèles dynamiques prennent en compte l'évolution des phénomènes en fonction du temps. Ils sont bien appropriés pour étudier les processus tels que la croissance des plantes ou l'élaboration des rendements qui intègrent des modifications du développement et des changements du milieu sur de longues périodes. Les modèles statiques sont utilisés pour une simple description d'un résultat final ou pour des systèmes en régime permanent ; les modèles de transfert de matière ou d'énergie sont souvent des modèles statiques ; les modèles de prévision de rendement établis à partir d'une simple équation de régression entre le rendement et certains facteurs climatiques sont également des modèles statiques.

Tout modèle doit être validé et testé.

Les modèles mathématiques résultent souvent de l'ajustement d'une courbe à une série d'observations. Par une série donnée de points expérimentaux, on peut faire passer une infinité de courbes mathématiques.

Le principe à retenir est de choisir le cas le plus simple parmi les meilleures solutions possibles.

### 3. CARTOGRAPHIER LA PRODUCTION VÉGÉTALE (Saugier, 1996<sup>4</sup>)

Des cartes de biomasse totale ont été réalisées à partir de mesures au sol prises en divers points du globe. Ces mesures ne sont pas parfaites et ont été relevées à des dates variées, souvent il y a plus de vingt ans, mais elles sont les seules actuellement disponibles. Dans l'avenir, on peut espérer obtenir des cartes de biomasse à partir de mesures satellitaires à l'aide de radars.

En effet, lorsqu'on envoie vers les surfaces naturelles un rayonnement radio de courte longueur d'onde (comprises entre 10 et 60 cm), celles-ci renvoient un rayonnement rétro diffusé qui dépend de la biomasse végétale. Les essais effectués par avion sur des forêts indiquent une réponse proportionnelle à la biomasse jusque vers 130 tonnes par hectare, chiffre proche de la biomasse moyenne des forêts du monde, mais évidemment bien inférieur à la biomasse de certaines forêts âgées. Pour rendre cette méthode opérationnelle, il faudrait disposer d'un satellite équipé d'un capteur adéquat, ce qui n'est pas encore le cas.

La biomasse foliaire a été calculée à partir de l'indice de végétation mesuré par satellite, et celle des racines fines a été estimée égale à la biomasse foliaire ; on considère que la part de biomasse qui n'est ni feuille ni racines fines est du bois. Comme seule la partie externe du tronc d'un arbre est vivante et respire, il a fallu calculer la fraction de bois vivant, qui diminue lorsque la biomasse augmente. Pour évaluer la dépendance de la respiration vis-à-vis de la température, une relation linéaire a été utilisée; elle semble bien traduire les variations observées en fonction de la latitude.

Bien que cette procédure puisse paraître compliquée, elle est extrêmement simplifiée par rapport aux processus réels intervenant dans la nature. Son avantage est de permettre une estimation de la production végétale à partir de mesures satellitaires : toute augmentation de couverture végétale sera immédiatement perçue par le satellite et répercutée en une augmentation de production.

Calculs de productivité par satellites d'après Ruimy *et al.* 1996<sup>5</sup>:

- la production primaire brute (PPB) est proportionnelle au rayonnement solaire absorbé par la végétation ;
- la respiration autotrophe ( $R_a$ ) est liée à la biomasse et à la température; elle est forte pour les forêts équatoriales ;
- La productivité primaire nette (PPN) est obtenue par la différence  $PPB - R_a$

---

<sup>4</sup> Saugier B., 1996. Végétation et atmosphère. Editions Flammarion, Dominos, Paris, 127 pages

<sup>5</sup> Ruimy *et al.* 1996. Global Biogeochemical Cycles, n°10, pp. 269-285

Cartes de photosynthèse, de respiration des plantes et, par différence, de production nette. La carte de photosynthèse reproduit celle du rayonnement absorbé par le feuillage, donnant des valeurs élevées dans la zone équatoriale où l'on a des rayonnements incidents élevés (malgré un couvert nuageux important) et un recouvrement végétal maximale toute année. La carte de respiration des plantes donne les valeurs les plus fortes pour les forêts équatoriales qui conjuguent fortes biomasses et températures élevées. Enfin, la carte de production nette combine les données précédentes et ressemble qualitativement à la première carte. Les valeurs globales sont respectivement de 133 Giga tonne de Carbone par an pour la photosynthèse (encore appelée production brute), de 71 Giga tonne de Carbone par an pour la respiration laquelle représente donc en moyenne 53 % de la photosynthèse, laissant 62 Giga tonne de Carbone par an pour la production nette. Il est clair que ces valeurs sont encore préliminaires et pourront évoluer sensiblement avec l'amélioration des mesures et de la paramétrisation.

L'approche satellitaire permet de décrire l'état actuel de la photosynthèse et de la respiration, mais non pas son évolution future puisqu'elle dépend des observations. On peut utiliser pour cela des modèles utilisant comme entrées les seules variables climatiques et la teneur en dioxyde de carbone de l'air, qui pourront être fournis par des sorties de modèles climatiques utilisant des scénarios réalistes d'évolution des émissions de gaz à effet de serre. On peut même coupler les modèles de production aux modèles climatiques comme cela commence à se faire. Ces modèles de production doivent représenter les connaissances de façon réaliste que possible.

On s'aperçoit à cette occasion que nos connaissances n'en sont pas au même stade suivant les domaines. On sait, par exemple, assez bien rendre compte de la photosynthèse d'un couvert végétal en fonction des conditions climatiques si on connaît son indice foliaire. La respiration des plantes est un peu moins bien connue, mais on y parvient également.

Celle des décomposeurs du sol pose quelques problèmes. En effet, dans les modèles actuels, elle dépend seulement de la température et de l'humidité du sol, qui doit donc aussi être calculée à l'aide **d'un modèle de bilan hydrique (voir chapitre 10 « MODELISATION DU BILAN DE L'EAU D'UNE FORET. APPLICATION A UNE FUTAIE DE CHENES », page 84).**

Mais la principale difficulté consiste à simuler correctement l'indice foliaire (ou le recouvrement végétal) et ses variations saisonnières, car tout le reste en dépend. Le problème est déjà difficile pour une culture annuelle comme le blé. Il l'est beaucoup plus encore pour les nombreux biomes « naturels ». Une solution adoptée dans certains modèles consiste à optimiser la production végétale : la

végétation ne met en place de feuillage que lorsque les conditions climatiques (température, alimentation en eau) permettent de dégager un bilan carboné positif entre la photosynthèse et la respiration. Cela permet de reproduire une dormance lorsque le temps est trop froid ou trop sec. De plus, l'indice foliaire maximal atteint en période de végétation est déterminé par le bilan hydrique du sol : s'il est trop fort, la réserve en eau du sol ne peut pas être rechargée par les précipitations au cours d'un cycle annuel, s'il est trop faible, une partie de l'eau du sol ne sera pas consommée. Le modèle détermine alors l'indice foliaire maximal compatible avec le régime hydrique du lieu.

Ces hypothèses d'optimisation sont intéressantes, mais restent en partie théorique: dans la réalité, les plantes ont souvent développé plusieurs stratégies complémentaires. Ainsi, dans les déserts, on trouve des plantes annuelles qui germent et poussent seulement lorsque les plus sont suffisantes; on trouve aussi des plantes à feuillage permanent dont les stomates restent fermés tant que dure la sécheresse. Il faudra donc dans l'avenir développer des modèles plus réalistes représentant ces divers groupes fonctionnels de plantes. Ces modèles existent déjà à l'échelle locale, mais leur extension à l'échelle globale paraît actuellement peu réaliste.

D'autre part, il ne faut pas oublier le rôle direct du dioxyde de carbone (en interaction avec la température) sur la photosynthèse et la production de biomasse. Son rôle à long terme est-il le même qu'à court terme ? Les arbres, s'ils poussent plus vite, vont-ils atteindre plus rapidement la même taille qu'aujourd'hui ou bien des tailles plus grandes ?

#### **4. CLIMATS, FORMATIONS VEGETALES ET ENVIRONNEMENT PHYSIQUE (Saugier, 1996)**

La végétation de la Terre est répartie sur les continents en fonction des climats existants, allant d'une forêt exubérante près de l'équateur à une végétation rase aux hautes latitudes. Quels sont les principaux facteurs climatiques déterminant ces types de végétation ?

Pour assurer leur photosynthèse, les plantes ont besoin de rayonnement solaire, d'eau et d'éléments minéraux. Leur croissance et leur reproduction exigent des températures ni trop basses ni trop élevées.

L'ensoleillement, qui varie avec la latitude et la saison, détermine l'énergie reçue par unité de surface de sol. Cette énergie est maximale entre les tropiques et décroît en allant vers les pôles. De plus, les variations saisonnières d'ensoleillement sont faibles près de l'équateur et augmentent lorsque l'on se

rapproche des pôles; il en va de même pour les variations saisonnières de température.

Par ailleurs, la circulation de l'atmosphère et des océans redistribue vers les pôles le surplus d'énergie absorbée près de l'équateur et détermine des zones de haute pression (plus sèches) et des zones de basse pression (plus humides).

La disponibilité en eau est un facteur clé du climat. Sur l'océan ou dans les zones continentales pluvieuses, l'essentiel du rayonnement solaire absorbé sert à évaporer l'eau disponible, laissant une faible part pour chauffer l'atmosphère. Ces climats présentent donc de faibles variations journalières de température. Au voisinage des océans, les variations de température sont de plus en plus atténuées par la grande capacité thermique de l'eau : c'est le climat océanique. Au contraire, dans les zones sèches des continents, l'essentiel du rayonnement solaire absorbé est utilisé pour chauffer l'atmosphère et on observe de fortes variations de température entre le jour et la nuit: c'est le climat continental, où les contrastes les plus marqués s'observent dans les déserts.

La circulation de l'atmosphère est modifiée par la rotation de la Terre: tout mouvement de l'air est dévié vers sa droite dans l'hémisphère Nord et vers sa gauche dans l'hémisphère Sud. Elle est aussi affectée par le relief, qui modifie températures et précipitations, avec un versant au vent plus humide et un versant sous le vent plus sec.

Ces différents facteurs déterminent les grands types de climat à la surface du globe. Le plus souvent, le climat est caractérisé par les températures et les précipitations. Les moyennes annuelles ne permettent pas de distinguer un climat humide toute l'année d'un climat avec saison sèche marquée; aussi est-il préférable de se référer aux moyennes mensuelles, qui traduisent l'ensemble des facteurs décrit ci-dessus.

Les météorologistes fournissent généralement un climat moyen: la température de juillet, par exemple, est établie comme la moyenne des températures des trente et un jours du mois, elle-même calculée en générale sur une durée de trente ans. Cette méthode ne permet cependant pas de repérer les événements exceptionnels. Ceux-ci jouent sans doute un rôle décisif dans la présence ou l'absence de certaines espèces de plantes et devraient être pris en compte à l'avenir.

Divers systèmes de classification des climats ont été élaborés depuis le XIX<sup>e</sup> siècle. Le géographe et météorologue allemand Wladimir Köppen<sup>6</sup> a ainsi distingué trois grands types de climat d'après les températures : les climats sans hiver des tropiques, avec une moyenne supérieure à 18 °C pour le mois le plus

---

<sup>6</sup> Köppen W., 1918. Handbuch der Klimatologie. Hamburg, vol. I-V.

froid, les climats sans été des hautes latitudes, avec une moyenne inférieure à 10 °C pour le mois le plus chaud, et les climats tempérés des latitudes moyennes, intermédiaires entre les deux. Köppen a subdivisé ces climats en tenant compte de la répartition des précipitations au cours de l'année, et y a ajouté un quatrième type, les climats secs, dans lesquels l'évaporation potentielle excède les précipitations pour tous les mois de l'année. Dans ces climats, l'eau n'est jamais en excès et aucune rivière ne prend sa source dans les régions concernées. Les forêts sont exclues des climats sans été et des climats secs.

En se déplaçant vers le nord à partir de l'équateur vers 22° de longitude est, on rencontre successivement la forêt tropicale humide à feuilles persistantes, du bassin du Congo au Zaïre, la forêt sèche à feuilles caduques, la savane, la steppe, le désert, la végétation méditerranéenne, la forêt feuillue, la forêt boréale de conifères (taïga), et enfin la toundra, au nord de la Scandinavie. Arbres et forêts dominaient la végétation du globe avant l'apparition de l'homme, à l'exception des zones trop froides ou trop sèches d'où ils étaient exclus.

La typologie ci-dessus est très sommaire, et l'on distingue selon les auteurs de dix à cent biomes en fonction de la finesse de résolution souhaitée. Les principaux types de végétation sont établis d'après la physionomie: forêts (peuplements denses d'arbres de plus de deux mètres de haut), steppe ou végétation herbacée (plantes de moins de deux mètres de haut) et mélange herbes - arbres de type savane. On doit y ajouter les cultures, qui représentent environ 11 % de la surface totale des continents, et les déserts.

Couverture végétale des continents en pourcentage de la surface totale (149 millions de km<sup>2</sup>): forêts - 24,0 % ; prairies et toundra - 14,7 % ; savanes - 15,0 % ; cultures - 11,0 % ; déserts et glaces - 30,5 % ; autres : eau libre, marais, villes - 4,8 %.

Les chiffres fournis sont toutefois à prendre avec précaution car ils varient selon les auteurs : ainsi, les pourcentages de forêts varie de 21 à 43 % et nous avons pris une valeur intermédiaire de 24 %. Il serait souhaitable de pouvoir les remettre à jour périodiquement sur la base des seules données satellitaires présumées objectives et fiables. Cela suppose que les divers biomes puissent être distingué d'après les caractéristiques des rayonnements qu'ils renvoient vers le satellite. On peut utiliser pour cela la variation saisonnière de l'indice de végétation, qui mesure la fraction de sol couverte de feuilles vertes. Cette variation est très différente selon qu'on a affaire à une forêt à feuilles persistantes, à une forêt à feuilles caduques ou à une prairie dont les rythmes de croissance et de sénescence foliaire sont décalés par rapport à ceux de la forêt. Des cartes de ce type sont en cours d'élaboration.

La correspondance entre la répartition de la végétation sur les continents et celle des climats a été remarquée depuis longtemps et les naturalistes ont cherché à quantifier ces relations dès le XIX<sup>e</sup> siècle. Divers systèmes de classification des climats ont ainsi vu le jour, comme celui de Köppen, décrit ci-dessus. Celui de Holdridge<sup>7</sup>, établi en 1947, a été largement utilisé pour tenter de prédire les déplacements de la végétation sous l'influence de changements climatiques. Il utilise seulement les moyennes annuelles de température et de précipitations, et définit chaque type de climat par des limites de ces deux variables. Comme la végétation se développe très peu au-dessous de 0 °C, il calcule une bio température qui est la moyenne annuelle des températures mensuelles supérieures à 0 °C, les températures négatives étant considérées égales à 0 °C.

De même, la disponibilité en eau du climat est un facteur important pour la végétation et cette disponibilité dépend non seulement des précipitations, mais aussi de l'évaporation qui augmente avec la température. Pour chaque fourchette de bio température et précipitations, Holdridge définit un climat en relation avec un type de végétation à l'aide de cases dans un diagramme en triangle. Une augmentation de température assez importante entraîne un changement de case et donc de végétation.

Ce système a été appliqué par Colin Prentice<sup>8</sup> (1980), de l'université de Lund en Suède, à la reconstitution de la végétation des époques glaciaires, et comparé à la répartition réelle reconstituée à partir d'analyses de pollen fossile qui s'est conservé dans les zones protégées de l'oxydation, comme les tourbières. Il offre l'avantage de la simplicité, mais ne prend toutefois pas en compte les facteurs non climatiques comme la concentration en dioxyde de carbone. De plus, il ne considère qu'une végétation en équilibre avec le climat, supposé stable sur une période de l'ordre du millénaire, ce qui n'est pas le cas, aujourd'hui moins que jamais. Il faut donc considérer le passage progressif d'un type de végétation à un autre, qui fait intervenir des facteurs biologiques complexes comme la vitesse de migration des espèces. Ces aspects commencent maintenant à être reconnus et pris en compte.

Lorsque la vie est apparue sur la Terre, elle a commencé à modifier le milieu dans lequel elle a pris naissance, prélevant des molécules simples et en rejetant d'autres, plus complexes. Cet effet, d'abord local, s'est progressivement étendu à l'ensemble du globe. Ainsi, l'oxygène de l'air que nous respirons a été produit par la photosynthèse au cours des temps géologiques. Puis, lorsque la vie a envahi les continents, de grands types de végétation se sont constitués, en équilibre avec le climat.

---

<sup>7</sup> Holdridge, L.R., 1947. Détermination des formations d'usine du monde à partir des données climatiques simples. *La Science*, 105, 367-368

<sup>8</sup> Prentice, C. I. 1980. Multidimensional scaling as a research tool in Quaternary palynology: a review of theory and methods. *Review of Palaeobotany and Palynology* 31, 71-104

A une échelle plus fine, on remarque en se promenant dans la campagne des éléments de paysage bien marqués: cultures, forêts, mares, prairies. Ces éléments ont une limite relativement nette. L'ensemble des plantes et des animaux qui vivent sur cet élément ainsi que le milieu (air, sol), qui a été modifié par la présence des êtres vivants, constituent un écosystème. Le préfixe éco- vient du grec *oikos*, qui signifie « maison », « habitat ». Le plus grand écosystème connu est la biosphère, qui regroupe l'ensemble des formes de vie sur Terre avec leur habitat : océans, partie superficielle de la Terre solide sur quelques dizaines de mètres de hauteur. La biosphère représente aussi un cas idéal d'écosystème dans la mesure où elle n'échange pratiquement pas de matière avec l'extérieur : on dit que c'est un système fermé pour la matière, mais ouvert pour l'énergie puisqu'elle absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde (0,25 à 5  $\mu\text{m}$ ) et émet vers l'espace un rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'onde (5 à 100  $\mu\text{m}$ ). En pratique, les écosystèmes sont souvent partiellement ouverts, mais leurs échanges internes sont plus importants que leurs échanges avec les autres écosystèmes.

On peut aussi définir l'écosystème comme la plus petite subdivision de la biosphère capable de se suffire à elle-même lorsqu'elle reçoit de l'énergie. Dans la pratique, sauf pour la biosphère, l'autosuffisance est partielle, car les pluies et le dioxyde de carbone que reçoit par exemple une forêt viennent de loin, l'atmosphère ne connaissant pas de frontières. Un écosystème peut être de très petite taille : ainsi, un aquarium bien géré nécessite peu d'apport de nourriture ; les poissons peuvent se nourrir de petits crustacés qui se nourrissent eux-mêmes de plancton.

On distingue trois types principaux d'organismes dans un écosystème:

- A la base se trouvent des producteurs ou autotrophes, capables de se nourrir eux-mêmes par photosynthèse à partir de molécules simples de leur milieu (dioxyde de carbone de l'air, eau et minéraux du sol); ce sont en général des plantes vertes poussant sur les continents.
- Ensuite viennent les consommateurs ou hétérotrophes, mangeant des plantes (herbivores) ou des animaux (carnivores),
- Enfin les décomposeurs, animaux du sol, bactéries et champignons, qui dégradent la matière organique des plantes et animaux morts en éléments minéraux réutilisables par les plantes.

Un écosystème peut se caractériser par sa structure – nombre d'espèces, répartition, biomasse -, et son fonctionnement, c'est-à-dire l'intensité des flux de matière qui le traversent et de ceux échangés avec l'extérieur. Il existe des relations étroites entre structure et fonctionnement, qui dépendent de l'histoire

de l'écosystème et des contraintes exercées par le milieu, telles que les températures extrêmes, la sécheresse, l'acidité ou la salinité des sols, *etc...*

La quantité de biomasse élaborée par un écosystème en un temps donné représente ce que l'on appelle *la production primaire nette*. Une partie de cette production permet l'accroissement de biomasse des plantes (croissance), le reste est consommé par les herbivores ou perdu par mortalité et apporté au sol. Cette production détermine l'intensité de tous les flux d'éléments minéraux circulant dans l'écosystème : carbone, eau, azote... Comme elle est formée par photosynthèse, elle dépend du rayonnement solaire intercepté par la végétation, c'est-à-dire du rayonnement incident et de la fraction de sol couverte par des feuilles vertes.

En France, par exemple, les éléments du paysage sont déterminés essentiellement par les hommes, qui décident de l'utilisation du sol. Mais si ces derniers cessaient soudain d'exercer leur influence, la végétation retournerait progressivement à son état naturel, une forêt feuillue sur presque tout le territoire (*climax*).

On appelle climax l'écosystème en équilibre avec son milieu, sans perturbation par les activités humaines. Cette notion a été suggérée aux biogéographes et écologistes du début du siècle par l'examen des correspondances étroites entre les grands biomes et les types de climat. Ils avaient aussi observé la colonisation de roches nouvellement apparues à la suite d'éruptions volcaniques. Les lichens et les mousses, capables de résister à une forte déshydratation, sont les premiers organismes à apparaître. Ils provoquent une altération des roches qui donne progressivement naissance à un sol, permettant l'apparition de plantes de plus en plus exigeantes en eau et en minéraux : graminées, arbustes, arbres. L'ensemble de ces phénomènes constitue ce que l'on appelle la *dynamique de l'écosystème*. Celui-ci naît, vit et peut mourir ou se modifier fortement en cas de perturbation importante.

Certains ont comparé l'écosystème à un organisme, mais cela n'est qu'une analogie car il ne peut y avoir de reproduction fidèle. En effet, l'écosystème, contrairement à un organisme, ne possède pas de patrimoine héréditaire. Les espèces qui le composent ne sont pas seulement déterminées par les conditions du milieu, mais aussi par le hasard, qui va favoriser la colonisation par les espèces les plus proches.

Le milieu est toutefois assez contraignant pour que l'on puisse déterminer des associations végétales, c'est-à-dire des ensembles d'espèces rassemblées sur le même type d'habitat. La présence de certaines espèces est liée à des conditions précises : on trouve par exemple les saules, les aulnes et les laîches sur des sols humides, les bouleaux et les bruyères sur le sol sableux acide. D'autres espèces

ont une large gamme d'habitats et leur présence ou absence est donc moins significative.

La notion du climax a été contestée car le milieu constant n'existe pas. Des perturbations, qu'elles soient externes (feu, tempête, froid, sécheresse, inondation) ou internes (attaques de parasites, exploitation), se produisent toujours. Même une forêt non exploitée en subit : la mort d'un arbre ouvre une clairière, apportant au sol lumière et chaleur. Ce changement de conditions stimulera d'abord la croissance de plantes de pleine lumière, puis la clairière se refermera progressivement, favorisant des espèces de plus en plus tolérantes à l'ombrage. La forêt naturelle est donc une mosaïque de petits sites à divers stades de régénération. Malgré ces difficultés, nous continuerons à utiliser la notion de climax à l'échelle régionale, car elle permet une bonne caractérisation de la végétation.

Les plantes vertes produisent des sucres [glucides ;  $(CH_2O)_n$ ] par **photosynthèse** à partir de dioxyde de carbone et d'eau. La masse de glucides produits en un temps donné constitue la **production primaire brute** (PPB). Ces glucides sont ensuite transformés en diverses molécules et incorporés dans les tissus végétaux; une partie des glucides produits par la photosynthèse est consommée par la respiration autotrophe ( $R_a$ ) pour assurer les besoins énergétiques des tissus non photosynthétiques, et des feuilles pendant la nuit.

La **production primaire nette** (PPN) est la différence entre la production primaire brute et la respiration autotrophe. Elle correspond à la production de biomasse par les plantes et s'exprime par exemple en gramme de matière sèche par mètre carré de sol et par an. On exprime la biomasse végétale en matière sèche car son contenu en eau est élevé (70 à 90 %) et variable selon les conditions d'eau du sol et du climat.

Comme le constituant essentiel de la biomasse est le carbone, on l'exprime aussi en **équivalent carbone**; la matière sèche contient en moyenne 45 % de carbone chez les plantes herbacées, 50 % dans le bois des arbres.

La destinée du carbone fixé dans PPN est triple:

- il peut en effet augmenter la masse de carbone présent dans la végétation ( $C_v$ );
- être consommé par des herbivores, c;
- ou passer à l'état de matière organique morte lorsqu'il se trouve dans des tissus sénescents ( $M_v$ ).

On peut donc écrire:

$$dC_v/dt = PPN - c - M_v \quad [1]$$

Avec:  $dC_v/dt$  – les variations du stock de carbone dans la végétation vivante;  $c$  – consommation;  $M_v$  – la mortalité végétale.

La biomasse des animaux ( $C_{an}$ ) augmente grâce à leur consommation, elle diminue par leur respiration ( $R_{an}$ ) et lorsqu'ils meurent. On peut donc écrire:

$$dC_{an}/dt = c - M_{an} - R_{an} \quad [2]$$

Avec:  $M_{an}$  – la mortalité des animaux.

Que devient la matière organique morte provenant des plantes et des animaux ?

Nous savons qu'elle est décomposée en quasi-totalité par les micro-organismes du sol qui rejettent le dioxyde de carbone lors de la respiration, le reste s'accumulant sous forme de carbone organique dans le sol ( $C_s$ ): c'est l'humus, qui se reconnaît à sa couleur sombre et à sa légèreté par rapport aux particules minérales du sol. On peut écrire que l'accumulation de carbone dans le sol est égale aux apports résultant de la mortalité des plantes et des animaux moins les pertes de carbone dues à la respiration des micro-organismes ( $R_m$ ):

$$dC_s/dt = (M_v + M_{an} - R_m) \quad [3]$$

Dans un écosystème non perturbé, on obtient au bout d'un temps assez long un état d'équilibre dans lequel les stocks de carbone dans les plantes, les animaux et le sol ne varient plus, ce qui implique :

$$dC_v/dt = dC_{an}/dt = dC_s/dt = 0$$

On en déduit en ajoutant les équations [1] - [2] et [3] et en éliminant  $c$ ,  $M_{an}$  et  $M_v$ :

$$PPN = (R_{an} + R_m) = R_h \quad [4]$$

En appelant  $R_h$  la respiration hétérotrophe, somme des respirations des animaux et des micro-organismes du sol.

L'équation [4] signifie que, en moyenne, l'écosystème n'échange pas de carbone avec l'extérieur. Dans le cas d'une forêt non exploitée, les arbres poussent en absorbant du dioxyde de carbone, mais celui-ci provient en totalité de la respiration de l'écosystème, qui vit donc en circuit fermé pour le carbone : la

croissance des arbres compense exactement leur mortalité. En pratique, l'écosystème présente toujours quelques fuites de carbone, dans l'atmosphère sous forme d'émissions d'hydrocarbures gazeux, dans les nappes souterraines et les rivières sous forme de carbone organique dissous ou particulaire, de carbonates et de dioxyde de carbone dissous. Ces fuites sont toutefois faibles et ne représentent, dans les rares cas où elles ont été estimées, que 1 à 2 % de la production primaire nette.

## 5. APPROCHE GENERALE DE LA CROISSANCE (Nizinski & Morand, 1991<sup>9</sup>)

**La production végétale du local au global:** la production végétale du local au global est assurée grâce à la photosynthèse qui produit des glucides ou sucres. Une partie du carbone fixé est ensuite consommé par la respiration. Deux groupes de méthodes ont été mis au point pour mesurer la production végétale:

- dans le premier, on mesure l'augmentation de biomasse des plantes poussant sur une surface de sol donnée;
- dans le second, on mesure les échanges de gaz carbonique entre la plante et l'air et on en déduit la quantité de carbone accumulé en un temps donné.

**Les mesures d'augmentation de biomasse:** le cas le plus simple est celui d'une culture de plantes annuelles, par exemple une culture de maïs. La culture est constituée de végétaux semblables plantés à densité constante. A intervalles réguliers, on prélève dix plantes au hasard dont on mesure la biomasse moyenne après séchage à l'étuve. La masse de feuilles est mesurée séparément et on en déduit leur surface, connaissant la masse par unité de surface, déterminée sur un échantillon de feuilles.

La biomasse de la culture s'obtient en multipliant la biomasse individuelle par la densité de plantes et s'exprime en gramme de matière sèche par mètre carré de sol. La production de biomasse de la culture par unité de temps et s'exprime en gramme par mètre carré et par jour. **L'indice foliaire** s'obtient de même en multipliant la surface foliaire d'une plante par la densité de plantes et s'exprime en unités sans dimensions (mètre carrés de feuilles par mètre carré de sol). La production maximale est obtenue en général au moment de la floraison, lorsque la culture atteint son développement foliaire maximal (6 à 8 pour une culture de blé qui absorbe alors près de 95 % du rayonnement solaire visible). Les pertes

---

<sup>9</sup> Nizinski J.J. & Morand D., 1991. Eléments d'éco-physiologie. Atelier « *L'adaptation à la sécheresse chez les arbres. Physiologie, techniques et méthodes d'étude* », Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse (R3S), Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS)-Station de Recherches sur le Palmier à Huile (SRPH), du 12 au 15 novembre 1991, Polycopié, Pobé, Bénin, 22 pages

par mortalité ou consommation, faibles dans les cultures, sont plus importantes dans les prairies permanentes et sont estimées en suivant, sur des plantes repérées, la dynamique de sénescence, d'apparition et de consommation des feuilles.

***La production d'un couvert végétal à l'échelle d'une parcelle:*** tout problème posé au bio climatologue doit se comprendre dans l'entité biophysique qu'est le système sol – plante – atmosphère. Le bioclimatologue – éco physiologiste – agronome – forestier travaillera donc au niveau de la parcelle occupée par une communauté végétale, avec comme optique essentielle l'étude de la production végétale en relation avec les facteurs climatiques et pédologiques.

La production d'un couvert végétal donné est déterminée:

- (a) par le programme génétique des espèces constituant le couvert;
- (b) par les facteurs du milieu qui agit sur la vitesse d'exécution du programme de façon continue (exemple la température) ou de façon discontinue (exemple la photopériode).

Ajoutons que la productivité d'un écosystème est presque toujours limitée par les ressources du milieu (eau, ions minéraux, CO<sub>2</sub>, éclaircissement...) au moins à certaines périodes dans le temps.

Les études de la bioclimatologie peuvent avoir soit un caractère descriptif (recherches des corrélations entre les facteurs climatiques et la production végétale) soit un caractère analytique (recherche de relations de causalité entre différents phénomènes, d'étude des mécanismes physiques, conception de modèles mécanistes...).

Les différents niveaux d'étude dans l'espace dépendent des moyens mis en œuvre : théoriquement, dans toute étude analytique on pourra travailler des niveaux les plus intégrés (plante entière, couvert végétal) jusqu'aux niveaux les plus réduits (métabolisme du carbone).

L'échelle de temps de ces études dépendra:

- (a) des espèces étudiées (durée de vie des espèces, phénophases, *etc...*);
- (b) du but recherché, compte tenu des variations instantanées, journalières, annuelles, des phénomènes climatiques et biologiques.

Dans l'étude de la production végétale, on peut distinguer trois niveaux d'approche :

- (a) des études de morphogénèse: études concernant les étapes de la différenciation des futurs organes;
- (b) des études de développement: études concernant la dynamique d'apparition (et de mortalité) des organes des individus;
- (c) des études de croissance: études concernant l'aspect quantitatif de la production de matière végétale (matière sèche), au niveau de l'organe, de la plante entière, du couvert. -

Parallèlement à la croissance, et de façon synchrone, se déroule la sénescence puis la mortalité des différents organes d'un individu. En conditions naturelles, la matière végétale représente le bilan des phénomènes continus de production et de mortalité de matière.

La production primaire n'est pas appréciable directement, il existe de nombreuses méthodes d'estimation de cette production:

- (a) méthodes basées sur la récolte des compartiments en place : biomasse, masse sèche, litière...;
- (b) méthodes basées sur le suivi de l'apparition et de la disparition des différentes organes;
- (c) méthodes basées sur la mesure de la photosynthèse nette, au niveau de la feuille ou du couvert.

La production de matière sèche (M.S.) est une fonction :

- (a) de la photosynthèse nette des organes qui assimilent le  $\text{CO}_2$  (les feuilles, mais aussi les tiges, les fruits..., en fonction des espèces) ; le phénomène de photosynthèse impliquant : (a<sub>1</sub>) l'interception de la lumière incidente dépendant de la mise en place de l'indice foliaire ; (a<sub>2</sub>) la conversion de l'énergie captée par les feuilles en énergie chimique contenue dans la matière sèche élaborée.
- (b) de la répartition des assimilats photosynthétisés entre les parties aériennes photosynthétiques et les racines.

La photosynthèse nette et la répartition des assimilats étant sous le contrôle des facteurs du milieu, pour une espèce donnée.

On peut résumer l'équilibre existant entre la croissance aérienne et la croissance racinaire ainsi:

- (a) la plante entière (parties aériennes et racines) dépend de ses parties aériennes pour sa fourniture en carbone (nutrition carbonée – photosynthèse) ; toute limitation de l'entrée nette de carbone (réduction de l'intensité photosynthétique ; destruction partielle de la surface

foliaire) favorisera la croissance aérienne relativement à la croissance racinaire et à la constitution des réserves carbonées;

- (b) la plante entière (parties aériennes et racines) dépend de ses racines pour sa fourniture en eau et en éléments minéraux. Toute limitation de la disponibilité en eau et éléments minéraux favorisera la croissance racinaire (et les réserves carbonées des racines) relativement à la croissance aérienne.

La répartition des assimilats détermine la proportion d'organes assimilateurs de carbone (CO<sub>2</sub>), la vitesse de croissance de la plante entière sera d'autant plus élevée qu'une proportion importante d'assimilats est investie dans les parties aériennes photosynthétiques.

La physiologie des géotypes des milieux « pauvres » est ajustée à la faible disponibilité en azote et éléments minéraux de ces milieux : une vitesse potentielle de croissance faible, donc des « besoins » en azote et éléments minéraux faible, induisant des prélèvements faibles en équilibre avec la disponibilité en éléments minéraux de ces sols ; une croissance lente due à une répartition des assimilats orientée vers les racines et les réserves carbonées ; une faible efficacité d'utilisation de l'azote pour la croissance.

Inversement, la physiologie des géotypes des milieux « riches » est en équilibre avec une disponibilité en azote et éléments minéraux élevée: une vitesse potentielle de croissance élevée, donc des « besoins » en azote élevés et satisfaits lorsque la disponibilité en azote est élevée; une forte efficacité d'utilisation de l'azote pour la croissance ; une répartition des assimilats orientée vers la croissance aérienne et donc la croissance de la plante entière leur conférant une aptitude à la compétition pour l'espace aérien et souterrain.

Field et Mooney (1984)<sup>10</sup> ont réuni les données de photosynthèse de douze auteurs concernant 33 espèces en C<sub>3</sub> adaptées à deux niveaux de nutrition minérale très différents, et ont exprimé les capacités photosynthétiques maximales en lumière saturante ( $\mu\text{Mole CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) en fonction de la teneur en azote foliaire ( $\mu\text{Mole N g}^{-1}$ ) : les conditions de croissance, l'âge de ces espèces sont très variables mais il ressort de ces données qu'il existerait une unique relation entre capacités photosynthétiques et teneur en azote foliaire pour tous les géotypes étudiés, suggérant que l'efficacité d'utilisation de l'azote dans le mécanisme photosynthétique serait similaire pour tous ces géotypes (à teneur en azote foliaire égale, capacité photosynthétiques égales) ; autrement dit ce caractère n'aurait pas fait l'objet d'une sélection particulière sous la pression des conditions de nutrition du milieu de ces géotypes (ce qui n'est pas le cas pour

---

<sup>10</sup> Field C. et Mooney H.A., 1984. The photosynthesis-nitrogen relationship in wild plants. *In*: Givnish, T.J. (éd.), *On the economy of plants form and function*, Cambridge University Press, 717 pages.

les espèces en C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub>, phénomène actuellement bien mis en évidence: Brown 1978<sup>11</sup>; Brown et Wilson, 1983<sup>12</sup>, les espèces en C<sub>4</sub> ont une efficacité d'utilisation de l'azote supérieure à celle des C<sub>3</sub>.

## 6. PHOTOSYNTHESE ET MESURES DE PHOTOSYNTHESE (Nizinski & Morand, 1991)

Le bio-climatologue s'intéressera à la photosynthèse nette du végétal, bilan biochimique de la somme de la photosynthèse brute, respiration et photorespiration:

- (a) **Photosynthèse brute** est la synthèse de la matière végétale à partir d'éléments minéraux de l'environnement CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O; l'assimilation du CO<sub>2</sub> en molécules carbonées exige un apport d'énergie qui est assuré par l'utilisation de l'énergie lumineuse. Chez les végétaux, ce sont les pigments assimilateurs qui sont impliqués dans les réactions de conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique: les photons absorbés par la feuille sont capables de faire émettre des électrons aux pigments assimilateurs. On peut considérer la photosynthèse comme un ensemble de réactions d'oxydoréduction;
- (b) **La respiration** est l'ensemble des réactions de dégradation des molécules complexes synthétisées lors de la photosynthèse; son rôle est double: la simplification des molécules complexes des glucides (ce sont les plus utilisées) donne des molécules plus simples qui serviront à d'autres synthèses (exemple la synthèse des protéines) et les réactions sont productrices d'énergie;
- (c) **La photorespiration** est un phénomène comparable à la respiration et se traduisant, entre autres phénomènes, par une perte de CO<sub>2</sub>, la photorespiration ne se déroule qu'à la lumière, et dans les quelques minutes qui suivent le passage à l'obscurité. Toutes les plantes ne présentent pas le phénomène de photorespiration (c'est dans le cas des plantes en C<sub>4</sub>).

Le bilan biochimique qu'est la photosynthèse nette peut être positif ou négatif, cela dépend des conditions de température, d'éclairement, des conditions hydriques, de l'âge des feuilles. L'assimilation du CO<sub>2</sub> exige un apport d'énergie qui est assuré par utilisation de l'énergie lumineuse, convertie en énergie chimique:

---

<sup>11</sup> Brown R.H., 1978. A difference in N use efficiency C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants and its implications in adaptation and evolution. *Crop Science*, 18, 93-98

<sup>12</sup> Brown R.H. et Wilson J.R., 1983. Nitrogen responses in *Panicum* species differing in CO<sub>2</sub> fixation pathways. (II) CO<sub>2</sub> exchange characteristics. *Crop Science*, 23, 1154-1159



Avec  $dG' > 0$  – réaction endothermique, réaction qui nécessite de l'énergie.

C'est donc en termes de rendements énergétiques que le bio-climatologue s'intéressera au phénomène de photosynthèse.

**Photosynthèse à l'échelle d'une feuille** (condition optimale) : la quantité de  $\text{CO}_2$  (ou carbone) assimilé est une fonction des caractéristiques du rayonnement incident arrivant sur la feuille (intensité, spectre, inclinaison par rapport à la feuille, *etc...*). Du rayonnement global incident ( $R_g$ ) arrivant sur la feuille, une partie est réfléchi, une partie transmise et une partie absorbée. Seuls les photons visibles intéressent la photosynthèse (l'énergie lumineuse est transportée sous forme de photons), l'unité que l'on utilise est la Mole de photons, soit:

$$W = Nw = N (h c / \lambda) \quad [6]$$

Avec:  $W$  – énergie transportée par un Mole de photons (1 Einstein) à une donnée, en Jules ;  $N$  – une Mole de photons ( $N_{\text{photons}} = 1$  Einstein ;  $N = 6,02 \times 10^{23}$ ) ;  $h$  – constante de Planck ( $h = 6,62 \times 10^{-34}$ ), en Jules  $\text{s}^{-1}$  ;  $c$  – vitesse de la lumière ( $c = 3 \times 10^{10}$ ), en  $\text{cm s}^{-1}$  ;  $\lambda$  – longueur d'onde, en cm.

- dans le bleu ( $\lambda_{470} = 470$  nm), l'énergie transportée par 1 Einstein est égale à 290 Joules ;
- en rouge ( $\lambda_{670} = 670$  nm), l'énergie transportée par 1 Einstein est égale à 200 Joules.

En intégrant sur tout le domaine du visible, de 400 à 700 nm, on obtient l'énergie correspondant en moyenne à 1 Einstein ou 1 Mole de photons, soit 1 Einstein<sub>400-700</sub> = 218 k Joules.

Ainsi on parle du visible comme étant le **Rayonnement Photosynthétiquement Utilisable** (PAR = 45 % de  $R_g$ ) ; une fraction seulement du PAR est absorbée (90 % de PAR) par la feuille le reste étant réfléchi ou absorbé mais dissipé sous forme de chaleur. Cette énergie absorbée sert à l'assimilation du  $\text{CO}_2$  avec un rendement de 15 %, c'est le **rendement quantique**. D'après l'équation [6]  $dG' = 472$  k Joules, or dans la feuille l'assimilation de 1 Mole de  $\text{CO}_2$  exige l'absorption de 14 Einstein dans le visible (14 Moles de photons), soit  $14 \times 218$  k Joules: l'assimilation de 1 Mole de  $\text{CO}_2$  s'effectue avec un rendement de 15 % [ $472 / (14 \times 218) = 0,15$ ] par rapport au rayonnement global [ $0,06 = 472 / (14 \times 218) \times 0,90 \times 0,45$ ]. Sur une base journalière, en tenant compte des pertes par respiration, le rendement par rapport au rayonnement global est de 1 à 2 %.

Quelques chiffres:

- 1 Mole de CO<sub>2</sub> ← → 14 g Carbone (14 g Carbone)
- Il y a 0,5 g de Carbone dans 1 g de masse sèche (M.S.)

**Photosynthèse à l'échelle du couvert** (condition optimale) : de Wit (1958)<sup>13</sup> a introduit le concept de production potentielle, c'est la quantité de matière sèche (M.S.) qui pourrait être élaborée par une végétation couvrant entièrement le sol si:

- (a) sa photosynthèse fonctionnait avec un rendement quantique maximal;
- (b) sa photosynthèse n'était limitée que par le rayonnement incident, soit 71 g M.S. m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> avec R<sub>g</sub> = 21 MJ m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup>.

La distribution du rayonnement dans un couvert peut s'exprimer d'après l'équation :

$$Rn_{(z)} = Rn_{(0)} \exp^{-k LAI} \quad [7]$$

Avec: Rn<sub>(z)</sub> – rayonnement net sous une couche de végétation d'indice foliaire LAI, en W m<sup>-2</sup>; Rn<sub>(0)</sub> – est sa valeur au-dessus du couvert, en W m<sup>-2</sup>; k – coefficient d'extinction (de 0,35 à 0,90) qui dépend du port des feuilles (vertical-horizontal) et de leurs propriétés optiques; LAI – indice foliaire.

La production réelle est évidemment inférieure car la végétation ne couvre pas entièrement le sol, la teneur de 330 ppm en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère est limitant, les températures ne sont pas optimales (ou trop basses ou trop élevées), l'eau est limitant, les éléments minéraux (azote) sont limitant en règle générale.

**Mesures de photosynthèse:** Les échanges de gaz carbonique peuvent être mesurés dans un système ouvert au moyen d'un analyseur à infrarouge (par exemple de type LCA2 d'Analytical Development Company®) et d'une chambre d'assimilation de type PLCN, ADC® (Dufrene, 1989<sup>14</sup>). On travaille avec des feuilles en place dont on enferme une portion du limbe de 5,6 cm<sup>2</sup> qui remplit la moitié de la surface de la chambre ; en fonction de l'espèce étudiée, une feuille entière ou une portion de feuille sera introduite dans la chambre. Le volume d'air dans l'enceinte (12 cm<sup>3</sup>) est brassé au moyen d'un ventilateur, sa température mesurée à l'aide d'une thermistance et son humidité relative grâce à un condensateur. Une cellule au silicium, fixée à proximité de la fenêtre (en polyméthylpentène) de la chambre, permet de mesurer le rayonnement incident visible (400 à 700 nm).

<sup>13</sup> De Wit C.T., 1958. Transpiration and crop yields. Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen, 64, 1-88

<sup>14</sup> Dufrene, E., 1989. Photosynthèse, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.), thèse de Docteur en Sciences, Université de Paris-Sud, Orsay, 156 pages

Les différentes intensités lumineuses ont été obtenues par atténuation du rayonnement au moyen de filtres neutres. Les résultats obtenus avec ce système sont sensiblement les mêmes que sous rayonnement naturel. Le flux d'air dans le circuit est mesuré à l'aide d'un débitmètre à flotteur et provient soit d'une bouteille d'air comprimé (teneur en CO<sub>2</sub> constante et humidité relative inférieure à 10 %) soit de l'atmosphère ambiante où il est pompé à 4 mètre de haut, puis injecté dans un volume tampon de 200 dcm<sup>3</sup> avant de pénétrer dans la chambre d'assimilation. Ce volume « mort » régule les variations brutales de gaz carbonique et de vapeur d'eau qui peuvent survenir dans l'atmosphère. L'air sortant de la chambre est desséché à l'aide de perchlorate de magnésium (inerte au CO<sub>2</sub>) afin d'éviter une interférence avec la vapeur d'eau dont le spectre d'absorption dans l'infrarouge recouvre partiellement celui du gaz carbonique.

L'analyseur fonctionne en remplissant alternativement sa cellule (toute les deux secondes) avec de l'air sans CO<sub>2</sub> (passé sur de la chaux sodée) et avec l'air issu de la chambre d'assimilation ce qui permet de corriger les dérives thermiques.

Afin que la différence de teneur en CO<sub>2</sub> soit maximale, il faut choisir de travailler à un faible débit sans placer de fuite avant l'analyseur. Ainsi, il faut le plus souvent utiliser un débit de 12 dcm<sup>3</sup> heure<sup>-1</sup> à l'entrée de la chambre d'assimilation pour obtenir, malgré les fuites éventuelles dans cette dernière, plus de 9 dcm<sup>3</sup> heure<sup>-1</sup> (ou 2,5 cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) dans l'analyseur, ce qui suffit amplement à remplir la cellule (3 cm<sup>3</sup>) lors de chaque cycle de deux secondes. Le débit d'air sec entrant dans la chambre (W), assimilation nette de CO<sub>2</sub> (A), la transpiration (R) et les conductances de couche limite (g<sub>a</sub>) et stomatique (g<sub>s</sub>) sont calculés à l'aide des relations suivantes :

- débit d'air sec entrant dans la chambre (W)

$$W = [(P - e_e) / P] (D / 22,4) [273 / (t_a + 273)] \quad (\text{Mole s}^{-1}) \quad [8]$$

Avec : D - débit d'air humide mesuré à l'entrée de la chambre, en dcm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> ; e<sub>e</sub> - pression partielle de vapeur d'eau dans l'air entrant dans la chambre, en bars ; P - pression atmosphérique, en bars ; t<sub>a</sub> - température de l'air dans la chambre, en °C.

- Photosynthèse nette (A)

$$A = (C_s - C_e) / (W / S_f) \quad (\text{Mole CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) \quad [9]$$

Avec : C<sub>s</sub> et C<sub>e</sub> - concentrations respectives de gaz carbonique dans l'air sec à la sortie et à l'entrée de la chambre, en vpm ; S<sub>f</sub> - surface foliaire enfermée dans la chambre d'assimilation, en m<sup>2</sup>.

- Transpiration (Tr)

$$Tr = (W / S_f) [e_{as} / (P - e_{as}) - e_{ae}] \quad (\text{Mole H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}) \quad [10]$$

Avec :  $e_{as}$  et  $e_{ae}$  – pression partielle de vapeur d'eau dans l'air respectivement à la sortie et à l'entrée de la chambre d'assimilation, en bars.

- Conductance de couche limite ( $g_a$ ). La conductance de couche limite se détermine au moyen d'un papier buvard humide disposé dans la chambre d'assimilation de façon similaire au limbe de la feuille sur lequel on envoie de l'air sec, le tout étant placé à l'obscurité

$$g_a = [(W/S_f)(e_{as} - e_{ae})] / (e_{a^*(tb)} - e_{as}) \quad (\text{Mole air m}^{-2} \text{ s}^{-1}) \quad [11]$$

Avec :  $e_{a^*(tb)}$  – pression partielle de vapeur d'eau saturante à la température du buvard, en bars.

## 7. BILAN HYDRIQUE COMPARE D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS DANS LE BASSIN DU KOUILOU (REPUBLIQUE POPULAIRE DU CONGO) (Nizinski et al. 2008<sup>15</sup>)

**Résumé.** - Depuis 1950 environ, la savane du littoral congolais est progressivement plantée d'Eucalyptus en peuplements denses exploités par rotations d'environ sept ans. Pour apprécier la durabilité de ces plantations d'Eucalyptus, il faut faire l'étude comparée des bilans énergétique, carboné, minéral et hydrique des deux écosystèmes, l'écosystème d'origine, la savane, et l'écosystème artificiel qui lui a succédé, les plantations d'Eucalyptus.

L'objectif de ce travail est d'étudier le bilan hydrique des deux écosystèmes et, plus particulièrement, leur évapotranspiration réelle (transpiration et évaporation). La futaie d'Eucalyptus étudiée est âgée de cinq ans (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL\*saligna*), a une hauteur moyenne de 24,2 m, une circonférence moyenne de 53,4 cm, une densité de 502 arbres ha<sup>-1</sup>, une surface terrière de 11,0 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, un indice foliaire de 3,2 et un volume de bois de 118,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. La savane étudiée est une savane à *Loudetia arundinacea*. On a mesuré toutes les semaines en saison des pluies de novembre 1996 à avril 1997, de novembre 1997 à avril 1998, de novembre 1998 à avril 1999 et en saison sèche, de juin à septembre 1997 et de juin à septembre 1998, les précipitations incidentes, les précipitations au sol (pluviomètres) et la réserve en eau du sol (sonde à neutrons, sonde TDR).

L'évapotranspiration, l'interception et la transpiration de la plantation et de la savane ont été estimées à partir de l'équation du bilan hydrique. La transpiration de la plantation a aussi été estimée par la méthode du flux de sève. L'établissement des profils hydriques du sol (humidité volumique et potentiel hydrique en fonction de la profondeur) nous a donné les zones d'absorption préférentielle et la profondeur de sol exploitée par ces communautés: 5 m pour la plantation d'Eucalyptus et 3 m pour la savane. Le drainage dans la plantation est moindre que celui dans la savane; cumulé sur trois ans, il est de 470,3 mm dans la plantation et de 827,3 mm dans la savane.

La plantation d'Eucalyptus est un écosystème artificiel qui absorbe/transpire toute l'année et qui consomme toute l'eau disponible. La succession de plusieurs années déficitaires réduira la production de bois de la plantation, mais sachant qu'entre 1950 et 1998, il n'y a eu qu'un seul épisode de quatre années déficitaires successives dans le bassin du Kouilou, et compte tenu de la durée de rotation de sept ans, cet épisode « sec » ne compromet pas la survie de la plantation, mais réduit seulement sa production. La savane a un cycle de végétation tel qu'à la fin de la saison sèche (septembre), il subsiste dans le sol de l'eau qui représente 15% de  $R_{RU}$ , lui permettant de subir trois années déficitaires successives sans incidence sur sa production.

**Mots clés :** durabilité, plantation, Eucalyptus, savane, bilan d'eau, évapotranspiration.

### 1. INTRODUCTION

Depuis 1950 environ, la savane du littoral congolais (figure 1) est progressivement plantée d'Eucalyptus en peuplements denses exploités par rotations d'environ sept ans (Laclau *et al.* 2000). Des plantations sont dites durables si elles répondent à de multiples critères, sociologiques, politiques, économiques et écologiques qui ont été redéfinis par le rapport de

---

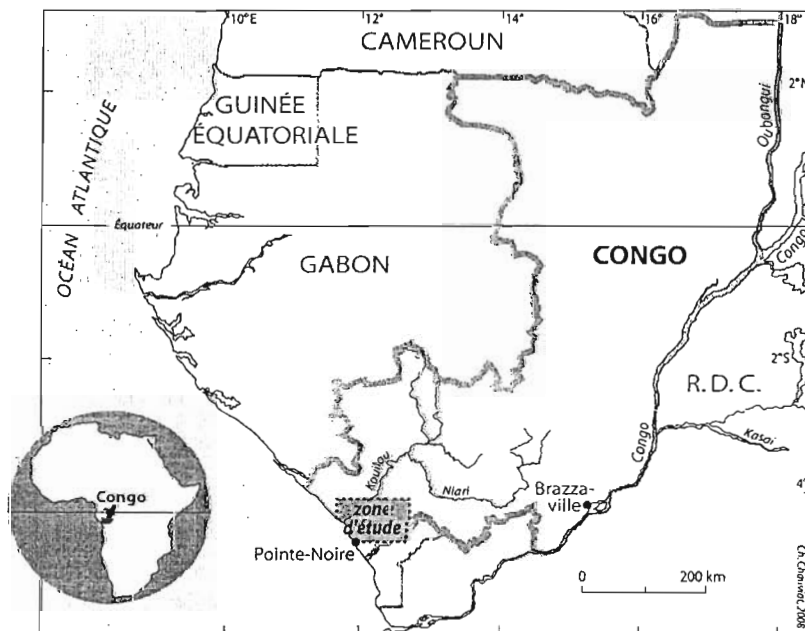
<sup>15</sup> Nizinski J.J., Morand D., Loumeto J.-J., Galat-Luong A. & Galat G., 2008. Bilan hydrique comparé d'une savane et d'une plantation dans le bassin du Kouilou (Congo-Brazzaville), *Climatologie*, vol. 5, 99-112

Brundtland (World Commission on Environment and Development, 1987). La durabilité de ces plantations d'Eucalyptus correspondrait à la situation théorique pour laquelle un écosystème proche de la savane d'origine succéderait à ces plantations si on cessait de les cultiver, ce qui suppose que les conditions climatiques régionales et pédologiques n'aient pas été radicalement modifiées par l'existence de ces plantations. Pour apprécier la durabilité de ces plantations d'Eucalyptus, il faut faire l'étude comparée des bilans énergétiques, carbonés, minéraux et hydriques des deux écosystèmes, l'écosystème d'origine, la savane, et l'écosystème artificiel qui lui a succédé, les plantations d'Eucalyptus.

L'objectif de ce travail est d'étudier le bilan hydrique des deux écosystèmes et, plus particulièrement, leur évapotranspiration réelle (transpiration et évaporation). La transpiration est le moteur du transfert de l'eau à travers la plante: il se crée une différence de potentiel hydrique entre les feuilles et les racines qui est à l'origine du flux d'absorption (une pompe hydraulique aspirante transférant l'eau du sol vers l'atmosphère, *i.e.* le continuum sol-plante-atmosphère).

La transpiration d'un écosystème est déterminée par :

- La demande évaporative de l'atmosphère (évapotranspiration potentielle) dépendant du rayonnement solaire, du déficit de l'humidité de l'air, de la température et de la vitesse du vent;
- Les mécanismes physiologiques de régulation stomatique du couvert, dépendant du génotype;
- La structure du couvert végétal et, plus particulièrement, l'indice foliaire;
- La quantité d'eau disponible pour la végétation, via la réserve utile du sol.



**Figure n°1 :** Localisation de la zone d'étude: région du Kouilou, sur la façade atlantique de la République du Congo (surface de 13.315 km<sup>2</sup>, située entre le Cabinda au sud et le Gabon au nord); cette région est soumise à un climat tropical humide de type équatorial de transition (climat bas-congolais). La façade maritime du Congo constitue la partie septentrionale de la zone plus sèche qui borde le continent africain au sud-ouest) avec des précipitations moyennes annuelles de  $P_{1949-1998} = 1188,4$  mm, une évapotranspiration potentielle (Penman) de 1390,4 mm.an<sup>-1</sup> ( $ETP_{92-98} = 3,8$  mm jour<sup>-1</sup>;  $ETP_{PLUIES} = 4,2$  mm jour<sup>-1</sup>,  $ETP_{SÈCHE} = 3,2$  mm jour<sup>-1</sup>), une température moyenne de l'air de 24,9°C ( $t_{max} = 28,2$ °C,  $t_{min} = 21,9$ °C), une humidité relative de l'air de 81,1% ( $H_{max} = 95,5$ %,  $H_{min} = 66,4$ %) ; moyennes calculées sur la période 1949-1998 à la station de référence de Pointe-Noire. La saison des pluies s'étale sur environ 150 jours de novembre à avril, la saison sèche va de juin à septembre; les mois de mai et octobre sont considérés comme des mois de transition. La zone d'étude se situe dans le bassin

sédimentaire côtier tertiaire (pliocène), de la série de cirques avec grès argileux, sables et argile. Les sols des stations d'études sont des sols ferrallitiques fortement dessaturés à texture sablo-argileuse (Vennetier, 1968). Les deux stations d'études sont situées à 40 km de Pointe-Noire à proximité du lieu-dit Kondi (latitude 4°34'S, longitude 11°54'E, altitude: 125 m).

L'Eucalyptus a été choisi pour sa croissance rapide, les rotations étant de sept ans. Des plantations d'Eucalyptus durables seraient des plantations dont la consommation en eau ne serait pas « excessive », les clones utilisés consommant moins que d'autres clones d'Eucalyptus ou que certaines autres espèces (par exemple *Pinus caribaea*).

Cette étude fournira les données nécessaires à la calibration d'un modèle hydrique permettant aux équipes de l'UR2PI de Pointe-Noire (Unité de Recherche sur la Productivité des Plantations Industrielles), du CIRAD et de l'INRA de Nancy d'étudier sur les mêmes sites le cycle des éléments minéraux majeurs (N, P, K, Ca, Mg) constituant des aspects de la durabilité de ces plantations d'Eucalyptus (Bouillet *et al.* 1999).

## 2. MATERIEL ET METHODES, STATIONS D'ETUDES ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'expression simplifiée du bilan hydrique du sol d'une savane (photo 1) ou d'une plantation d'Eucalyptus (photo 2) peut s'écrire sous la forme suivante:

$$P_i = ETR + D \pm \Delta R / \Delta t \quad [1]$$

$$\text{où } ETR = T + I_n + E_s \quad [2]$$

$$\text{et } I_n = P_i - (P_s + E_c) \quad [3]$$

avec:  $P_i$  - précipitations incidentes, en mm jour<sup>-1</sup>; ETR - évapotranspiration réelle du peuplement, en mm jour<sup>-1</sup>; D - drainage, en mm jour<sup>-1</sup>;  $\Delta R$  - variation de la réserve en eau du sol, en mm;  $\Delta t$  - pas de temps des calculs, en jours; T - transpiration, en mm jour<sup>-1</sup>;  $I_n$  - interception nette, en mm jour<sup>-1</sup>;  $E_s$ , évaporation du sol, en mm jour<sup>-1</sup>;  $P_s$  - précipitations au sol, en mm jour<sup>-1</sup>;  $E_c$  - écoulement le long des troncs pour la plantation, en mm jour<sup>-1</sup>.

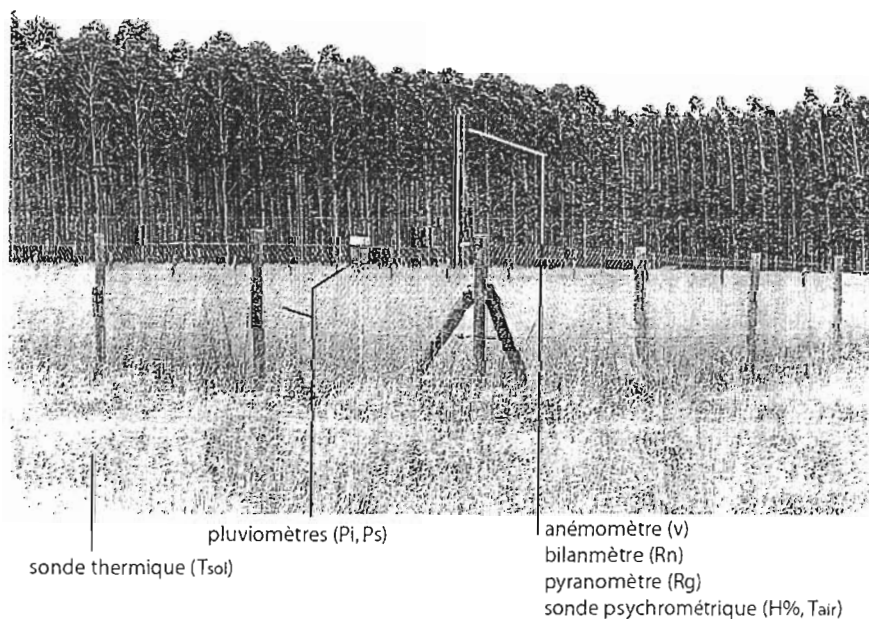
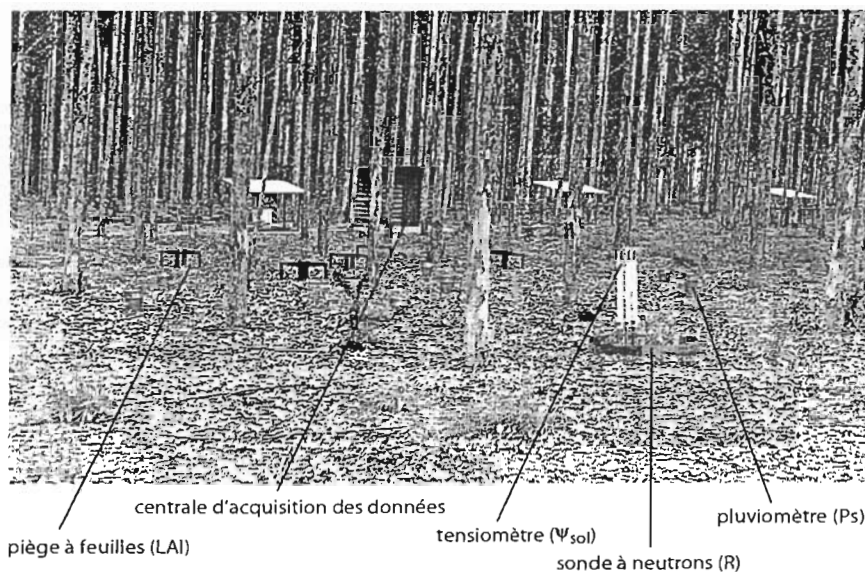


Photo 1: Vue de la station d'étude n°1: une savane dominée à 90% par *Lutetia arundinacea* (hauteur moyenne de 1,5 m; biomasse maximale de 3,5 tonnes ha<sup>-1</sup> et masse morte maximale de 4,6 tonnes ha<sup>-1</sup>, indice foliaire de 4,3; zone racinaire de 3 m; capacité au champ  $R_{CC}=363$  mm; point de flétrissement permanent  $R_{FP}=181,8$  mm; réserve utile  $R_{RU}=181,2$  mm).



**Photo 2:** Vue de la station d'étude n°2: une futaie d'Eucalyptus (*Eucalyptus PFI* et *Eucalyptus 12ABL\*saligna*) plantés en janvier 1992 à l'état de plantules issues de boutures, plantules d'environ 0,3 m de hauteur) de cinq ans plantés selon des rangs orientés sud-ouest avec un écartement de 4 m entre deux individus d'une même ligne et un écartement de 4,7 m entre deux lignes: hauteur moyenne de 24,2 m; circonférence moyenne de 53,4 cm; densité de 502 arbres ha<sup>-1</sup>; surface terrière de 11,0 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>; indice foliaire de 3,2; volume de bois de 118,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; zone racinaire de 5 m; capacité au champ R<sub>CC</sub>=617,6 mm; point de flétrissement permanent R<sub>PPF</sub>=309,2 mm; réserve utile R<sub>RU</sub>=308,4 mm.

Cette expression considère comme négligeable l'évaporation directe du sol et de la litière, approximation raisonnable seulement en période de dessèchement. La réserve en eau du profil du sol (R), les précipitations au dessus du peuplement (Pi) et au sol (Ps) ainsi que l'écoulement le long des troncs (E<sub>c</sub>) ont été mesurés; les valeurs du drainage (D), l'évapotranspiration (ETR), l'interception (In) et la transpiration (T) de la plantation et de la savane ont été estimées à partir de l'équation du bilan.

Par ailleurs, la transpiration de la plantation est estimée par la méthode du flux de sève : l'eau ayant une très forte chaleur massique, la méthode est basée sur la mesure de la vitesse de déplacement d'une onde thermique suite à l'émission d'une brève impulsion de chaleur (Granier, 1987). Dans l'équation du bilan, on suppose que l'ETR soit égale à l'ETP (évapotranspiration potentielle) en période humide (réserve du sol à la capacité au champ, R<sub>CC</sub>) et, au contraire, un drainage nul en période sèche (réserve du sol inférieure à la capacité au champ). Dans le bilan hydrique du sol à l'échelle d'une journée, les valeurs de l'ETR sont calculées comme suit :

$$\text{Si } R > R_{CC}, \text{ alors } ETR = ETP \text{ et } D = P_i - ETP \pm \Delta R / \Delta t \quad [4]$$

$$\text{Si } R < R_{CC}, \text{ alors } D = 0 \text{ et } ETR = P_i \pm \Delta R / \Delta t \quad [5]$$

Avec: ETP - évapotranspiration potentielle en mm jour<sup>-1</sup>.

Pour estimer l'évapotranspiration potentielle, nous avons utilisé la formule de Penman (1948). Les valeurs ont été calculées chaque jour pour les deux stations d'études, puis cumulées sur les durées correspondant aux intervalles de mesures. Cette équation est applicable pour un couvert dense et étendu (*i.e.* > 100 m<sup>2</sup>).

$$ETP = (\Delta R n / \lambda + \gamma E a) / (\Delta + \gamma) \quad [6]$$

avec:  $R_n$  - rayonnement net ou effectif, en  $W m^{-2}$ ;  $\lambda$ - chaleur latente de vaporisation, en  $J kg^{-1}$  ( $2451,8 J g^{-1}$ );  $\gamma$  - constante psychrométrique, en  $kPa ^\circ C^{-1}$ ;  $E_a$  - évaporation d'une surface dont la température serait celle de l'air, mesurée sous abri, en  $mm jour^{-1}$ ;  $\Delta$  - dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en  $kPa ^\circ C^{-1}$ ,

$$\text{Où : } R_n = (1-a)R_g - (R_a - R_t) \quad [7]$$

Avec:  $R_n$  - rayonnement net ou effectif, en  $W m^{-2}$ ;  $R_g$  - 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 de la surface (albédo de la plantation d'Eucalyptus:  $a=0,13$ ; albédo de la savane:  $a=0,25$ ).

L'hypothèse d'un drainage nul lorsque  $R < R_{CC}$  est liée à la texture sableuse du sol, qui implique une chute très rapide de conductivité hydrique avec le dessèchement du sol. Elle n'est strictement vraie que lorsque l'humidité de l'horizon le plus profond est devenue inférieure de quelques points à sa valeur à la capacité au champ. Dans les deux cas (équations [4] et [5]), la transpiration du peuplement est calculée en soustrayant l'interception nette ( $I_n$ ) calculée à l'aide de l'équation [8] de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

$$T = ETR - I_n \quad [8]$$

Ces calculs utilisent les notions de capacité de rétention en eau maximale du sol de la zone racinaire (capacité au champ,  $R_{CC}$ ), de capacité de rétention minimale (point de flétrissement permanent,  $R_{PPF}$ ) et d'évapotranspiration potentielle (ETP). La zone exploitée par les racines a été bien délimitée (5 m pour la plantation et 3 m pour la savane); d'autre part, les caractéristiques topographiques et pédologiques sont telles qu'il n'y a sur les stations d'expérimentation ni nappe phréatique proche, ni ruissellement en surface et dans le sol (pente proche de  $\pm 1\%$ ). Nous avons déterminé les valeurs de  $R_{CC}$  et  $R_{PPF}$  *in situ* comme étant les valeurs maximale et minimale de la réserve en eau. Le tableau 1 synthétise l'ensemble des mesures effectuées (type de mesure, fréquence, caractéristique du matériel utilisé).

Les données météorologiques proviennent de la station météorologique de Pointe-Noire, située à 40 km au sud des stations d'études (Direction de l'Exploitation Météorologique de l'ASECNA, Aéroport de Pointe-Noire, latitude  $4^\circ 49'S$ , longitude  $11^\circ 54'E$ , altitude 16 m IGN). Les données météorologiques issues respectivement de la station météorologique et du site d'étude ont été comparées en 1996 par Nizinski et al. (2002) et sont similaires.



|   | SAISONS DES PLUIES - 1er novembre au 30 avril (181 jours) |  |  |   |   |   |   |  | SAISONS SÈCHES - 1er juin au 30 septembre (122 jours) |  |                                       |                                       |                                       |  |  |
|---|---|--|--|---|---|---|---|--|---|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|
|   | 1996-1997   |  | 1997-1998  |   | 1998-1999                                       |   | moyenne 1996-1999   |  | 1997  |  | 1998                                  |                                       | moyenne 1997-1998                     |  |  |
|   | <i>Eucalyptus</i>   | <i>Savane</i>                                | <i>Eucalyptus</i>                                | <i>Savane</i>                                   | <i>Eucalyptus</i>                               | <i>Savane</i>                                   | <i>Eucalyptus</i>   | <i>Savane</i>  | <i>Eucalyptus</i>                                     | <i>Savane</i>                          | <i>Eucalyptus</i>                     | <i>Savane</i>                         | <i>Eucalyptus</i>                     | <i>Savane</i>                          |  |
| Rayonnement net (Rn)<br>W m <sup>-2</sup>   | 416,9   | 345,5  | 441,9  | 366,6   | 435,5   | 359,8   | 431,4   | 357,3  | 272,4   | 223,2                                  | 290,3                                 | 238,1                                 | 281,4                                 | 230,7                                  |  |
| Evapotranspiration potentielle (ETP)<br>mm<br>mm jour <sup>-1</sup>   | 780,5<br>4,3  | 717,2<br>4,0                                 | 851,5<br>4,7                                     | 779,2<br>4,3                                    | 856,7<br>4,7                                    | 785,0<br>4,3                                    | 829,6<br>4,6  | 760,5<br>4,2   | 373,9<br>3,1  | 347,8<br>2,9                           | 402,4<br>3,3                          | 3,1                                   | 388,2<br>3,2                          | 361,2<br>3,0                           |  |
| Précipitations incidentes (Pi)<br>mm<br>mm jour <sup>-1</sup>   | 459,3<br>2,5  | 459,3<br>2,5                                 | 1338,5<br>7,4                                    | 1338,5<br>7,4                                   | 1139,9<br>6,3                                   | 1139,9<br>6,3                                   | 979,2<br>5,4  | 979,2<br>5,4   | 15,5<br>0,1   | 15,5<br>0,1                            | 63,5<br>0,5                           | 63,5<br>0,5                           | 39,5<br>0,3                           | 39,5<br>0,3                            |  |
| Précipitations au sol (Ps)<br>mm<br>mm jour <sup>-1</sup><br>% de Pi  | 412,3<br>2,3<br>89,8                                      | 422,5<br>2,3<br>92,0                         | 1198,0<br>6,6<br>89,5                            | 1206,3<br>6,7<br>90,1                           | 991,0<br>5,5<br>86,9                            | 1005,5<br>5,6<br>88,2                           | 867,1<br>4,8<br>88,7  | 878,1<br>4,9<br>90,1                                   | 9,8<br>0,1<br>63,1                                    | 13,4<br>0,1<br>86,6                    | 39,9<br>0,3<br>62,9                   | 47,1<br>0,4<br>74,2                   | 24,8<br>0,2<br>63,0                   | 30,3<br>0,2<br>80,4                    |  |
| Ecoulement le long des troncs (Ec)<br>mm<br>mm jour <sup>-1</sup><br>% de Pi  | 9,2<br>0,1<br>2,0   |  | 26,8<br>0,1<br>2,0                               |   | 22,8<br>0,1<br>2,0                              |   | 19,6<br>0,1<br>2,0  |  | 0,3<br>0,0<br>2,0                                     |  | 1,3<br>0,0<br>2,0                     |                                       | 0,8<br>0,0<br>2,0                     |  |  |
| Interception nette (In)<br>mm<br>mm jour <sup>-1</sup><br>% de Pi   | 47,0<br>0,3<br>10,2                                       | 36,8<br>0,2<br>8,0                           | 140,5<br>0,8<br>10,5                             | 132,2<br>0,7<br>9,9                             | 148,9<br>0,8<br>13,1                            | 134,4<br>0,7<br>11,8                            | 112,1<br>0,6<br>11,3  | 101,1<br>0,6<br>9,9                                    | 5,7<br>0,0<br>36,9                                    | 2,1<br>0,0<br>13,4                     | 23,6<br>0,2<br>37,1                   | 16,4<br>0,1<br>25,8                   | 14,7<br>0,1<br>37,0                   | 9,2<br>0,1<br>19,6                     |  |
| Transpiration (T)<br>mm<br>mm jour <sup>-1</sup>  | 693,2<br>3,8  | 436,2<br>2,4                                 | 707,8<br>3,9                                     | 584,6<br>3,2                                    | 564,7<br>3,1                                    | 412,7<br>2,3                                    | 655,2<br>3,6  | 477,8<br>2,6   | 93,9<br>0,8   | 112,2<br>0,9                           | 242,8<br>2,0                          | 112,2<br>0,9                          | 168,4<br>1,4                          | 112,2<br>0,9                           |  |
| Evapotranspiration (ETR)<br>mm<br>mm jour <sup>-1</sup>   | 740,2<br>4,1  | 473,0<br>2,6                                 | 848,3<br>4,7                                     | 716,9<br>4,0                                    | 713,6<br>3,9                                    | 547,1<br>3,0                                    | 767,4<br>4,2  | 579,0<br>3,2   | 99,7<br>0,8   | 114,3<br>0,9                           | 266,4<br>2,2                          | 128,6<br>1,1                          | 183,0<br>1,5                          | 121,5<br>1,0                           |  |
| Drainage (D)<br>D = Ps+Ec-ETR mm<br>R <sub>30.04</sub> mm<br>R <sub>1.11</sub> mm<br>dR = R <sub>30.04</sub> - R <sub>1.11</sub> mm<br>D = Ps+Ec-ETR-dR mm<br>mm jour <sup>-1</sup> | 0,0<br>377,6<br>361,1<br>16,5<br>0,0<br>0,0               | 0,0<br>360,9<br>222,3<br>138,5<br>0,0<br>0,0 | 376,4<br>508,1<br>338,7<br>169,4<br>207,1<br>1,1 | 489,4<br>337,8<br>238,1<br>99,7<br>389,7<br>2,2 | 300,2<br>462,8<br>425,8<br>37,0<br>263,2<br>1,5 | 458,4<br>347,0<br>326,2<br>20,8<br>437,6<br>2,4 | 225,6<br>315,9<br>0,0<br>345,3<br>311,8<br>33,5<br>156,8<br>0,9 | 315,9<br>0,0<br>298,6<br>230,2<br>68,5<br>275,8<br>1,5 | 0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0                | 0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0 | 0,0<br>484,8<br>380,3<br>104,5<br>0,0 | 0,0<br>297,8<br>344,1<br>-46,3<br>0,0 | 0,0<br>297,8<br>344,1<br>-46,3<br>0,0 | 0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0 | 0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0<br>0,0 |

**Tableau 2** : Rayonnement net (Rn), précipitations incidentes (Pi), précipitations au sol (Ps), interception nette (In), transpiration (T), drainage (D), évapotranspiration réelle (ETR) et potentielle (ETP). Valeurs cumulées durant les saisons des pluies et saisons sèches du 17 février 1997 au 26 juillet 1999: (a) plantation d'*Eucalyptus* (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL\*saligna*); (b) savane à *Loudetia arundinacea*.

Le peuplement d'*Eucalyptus* (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL\*saligna*) a des feuilles toute l'année (indice foliaire de 3,2), donc absorbe/transpire toute l'année. Les herbacées de la savane (dominée par *Loudetia arundinacea*, présence de *Elyonrus brazzae*, *Ctenium newtonii*, *Rhynchelytrum nerviglume*, *Loudetia simplex*, *Probelaniceps*, *Erosema glomeratum*, *Cassia mimosoides*, *Cyanotis*) sont des plantes annuelles qui absorbent et transpirent pendant la saison des pluies, et pendant les mois de transition (mai et octobre), avec un indice foliaire moyen de 2,9 et un maximum de 4,1 en février (Nizinski *et al.* 2002).

### 3.2. COUVERTS ARBORESCENT ET HERBACEE : INCIDENCE SUR LES ELEMENTS DU BILAN HYDRIQUE

Le bilan hydrique du sol dépend du type de couvert (par sa structure: étendue, taille, rugosité, présence ou absence des feuilles, pigmentations, *etc*), le type de couvert conditionnant le bilan radiatif et énergétique Rn – voir équation [7]): la quantité de rayonnement solaire absorbée par les surfaces (dépendant de l'albédo) est dissipée, pour l'essentiel, dans l'air environnant sous forme de chaleur latente ( $\lambda E$  - utilisé dans le processus d'évaporation d'eau) et sous forme de chaleur sensible (H - température ambiante). Les valeurs de l'albédo utilisées dans le calcul de l'ETP pour les années 1996 et 1997 (albédo  $a_{EUCALPTUS}=0,13$  et  $a_{SAVANE}=0,25$ ) sont issues de la bibliographie de Pinker *et al.* 1980. Ces valeurs ont été vérifiées par des mesures *in situ* en septembre 1998 ( $a_{EUCALPTUS}=0,12$  et  $a_{SAVANE}=0,23$ ; Nizinski *et al.* 2002).

Pour la période 1992-98 (durée de vie prévue de la plantation étudiée; tableau 2), la moyenne du **rayonnement net** moyen journalier ( $W m^{-2}$ ) est pour la plantation et pour la savane respectivement de 387 et 320  $W m^{-2}$  (voir le détail des valeurs de la saison des pluies et de la saison sèche; tableau 2). Ainsi, la quantité d'énergie disponible pour la plantation est supérieure à l'énergie disponible pour la savane de 74  $W m^{-2}$  en saison des pluies et de 51  $W m^{-2}$  en saison sèche, d'où une quantité d'énergie utilisée pour évaporer l'eau supérieure au sein de la plantation par rapport à la savane. Le rayonnement net moyen journalier pendant les années 1996, 1997 et 1998 (tableau 2) est inférieur à la moyenne établie sur la période 1992-98; nous avons, pour la plantation et la savane, respectivement 3385 et 319  $W m^{-2}$  en 1996; 367 et 303  $W m^{-2}$  en 1997; 377 et 311  $W m^{-2}$  en 1998.

Les valeurs de  $R_n$  de la savane (moyenne sur les trois années étudiées) sont comparées à celles obtenues par Riou (1975) au Centre ORSTOM de Brazzaville pour un gazon bien alimenté en eau pour la période 1968-71 (240  $W m^{-2}$  en saison des pluies et 166  $W m^{-2}$  en saison sèche). Ces valeurs sont supérieures respectivement de 117 et de 65  $W m^{-2}$  aux nôtres, la différence étant due au type de surface et à la durée d'insolation de Pointe-Noire supérieure à celle de Brazzaville.

**L'évapotranspiration potentielle** moyenne annuelle et moyenne journalière calculée sur la période 1992-98 est de 1395  $mm an^{-1}$  (3,8  $mm jour^{-1}$  sur l'année, 4,1 en saison de pluies et 3,1 en saison sèche). Elle est proche de celle estimée par Riou (1975), calculée suivant la même formule de Penman pour la région de Brazzaville ( $ETP_{68-71}=1420 mm an^{-1}$ ). L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle et moyenne journalière calculée sur la période 1996-98 (tableau 2) a été respectivement pour la plantation et pour la savane de 830 et de 760  $mm$  (4,6 et 4,2  $mm jour^{-1}$ ) en saison des pluies et de 388 et de 361 (3,2 et 3  $mm jour^{-1}$ ) en saison sèche.

**Les précipitations au sol et l'interception nette** moyenne sur les trois saisons des pluies s'élèvent respectivement à 867 et 112  $mm$  (89 et 11 % de  $P_i$ ) pour la plantation d'*Eucalyptus* et à 878 et 101  $mm$  (90 % et 10 % de  $P_i$ ) pour la savane. Pour la plantation d'*Eucalyptus*, les valeurs sont proches de celles obtenues par George (1978) pour un peuplement d'*Eucalyptus tereticornis* en Inde âgé de 6 ans ( $P_i=1670 mm an^{-1}$ ) pour lequel  $I_n=12$  % de  $P_i$ ; nous citerons aussi Calder (1986) concernant un peuplement d'*Eucalyptus saligna* âgé de 6 ans au Brésil ( $P_i=1280 mm an^{-1}$ ) pour lequel  $I_n=12$  % de  $P_i$ , ainsi que Smith (1974) concernant un peuplement d'*Eucalyptus regnans* en Australie ( $P_i=810 mm an^{-1}$ ) pour lequel  $I_n=11$  % de  $P_i$ . En moyenne, sur les trois années étudiées, les entrées d'eau sous forme de précipitations au sol de la plantation sont inférieures de 11  $mm$  à celles de la savane; mais si on ajoute l'écoulement le long des troncs (19,6  $mm$ ), les entrées d'eau dans la plantation sont alors de 8,6  $mm$  supérieures à celles de la savane. La capacité maximale de rétention en eau des deux types de couvert, 0,9  $mm$  pour la plantation et 0,6  $mm$  pour la savane, explique ces valeurs ainsi que celles de l'interception nette. On comparera les valeurs de capacité maximale de rétention en eau du couvert de la plantation à celles citées par Calder (1986) à propos de plantations d'*Eucalyptus* se situant à Fiji (valeurs comprises entre 0,8 et 1,4  $mm$ ).

### 3.3. ELEMENTS DU BILAN : TRANSPIRATION, T/ETP, EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET DRAINAGE

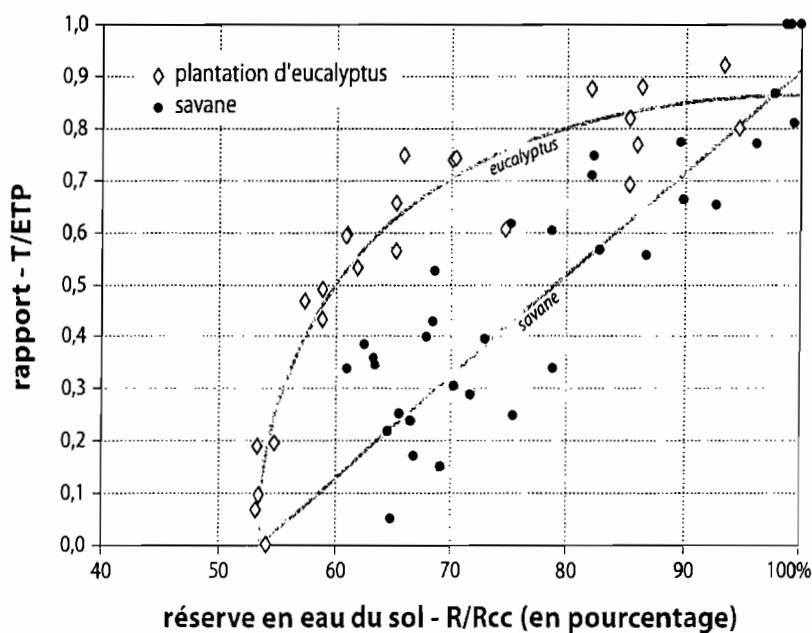
**La transpiration** moyenne saisonnière et moyenne journalière sur les trois années 1996, 1997 et 1998, pour la plantation et pour la savane, est respectivement de 655 et de 478  $mm$  (3,6 et 2,6  $mm jour^{-1}$ ) en saison des pluies, et de 168 et 112  $mm$  (1,4 et 0,9  $mm jour^{-1}$ ) en saison sèche. Pour de nombreux peuplements d'*Eucalyptus*, la transpiration moyenne journalière varie de 3 à 5  $mm jour^{-1}$  en conditions hydriques non limitantes, avec des maxima journaliers

allant jusqu'à 6-8 mm jour<sup>-1</sup> selon Dye (1987) et des minima de 1 à 3 mm jour<sup>-1</sup> selon Roberts et Rosier (1993).

L'indice foliaire maximal (LAI, Leaf Area Index) obtenu pour notre station d'Eucalyptus est de 3,2. Cette valeur est proche de celles de peuplements comparables. Selon Roberts *et al.* (1992), pour des peuplements indiens âgés de 6 ans, il est de 2,2 pour *Eucalyptus tereticornis* et de 2,3 pour *Eucalyptus camaldulensis*; selon Gazarini *et al.* (1990), il est de 3,8 pour *Eucalyptus grandis* âgé de 6 ans et situé au Portugal et, selon Beadle *et al.* (1995), de 3 à 4,5 pour *Eucalyptus globulus* âgé de 4 ans et situé en Australie.

La résistance stomatique moyenne du couvert d'Eucalyptus,  $r_s$  (moyenne établie de 1996 à 1998) a été calculée en utilisant le modèle de Jarvis (Stewart, 1988). Elle dépend (a) de la résistance stomatique minimale  $r_{smin}$  mesurée dans des conditions supposées non limitantes et disponibilité en eau, (b) de l'indice foliaire, (c) du rayonnement net, (d) du déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air, (e) de la différence entre la réserve en eau à la capacité au champ et la réserve en eau du moment RCC-R. Pour un indice foliaire de 3,2, la résistance stomatique minimale est de 6,1 m s<sup>-1</sup> en saison des pluies et de 16,7 m s<sup>-1</sup> en saison sèche. Nos valeurs de résistance stomatique minimale en saison des pluies recoupent celles de Beadle *et al.* (1995): en conditions hydriques non limitantes, la résistance stomatique minimale moyenne d'un couvert d'Eucalyptus (valeurs moyennes annuelles de plusieurs peuplements) est de 5,9 m s<sup>-1</sup> pour un indice foliaire de 3,5. La résistance stomatique minimale moyenne de la savane est respectivement de 3,5 m s<sup>-1</sup> en saison des pluies et de 5,4 m s<sup>-1</sup> en saison sèche pour un indice foliaire compris entre 2,6 en août à 4,1 en février.

La transpiration (T) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) varient dans le temps, et le rapport T/ETP (transpiration relative) varie en fonction de l'état hydrique du sol. La variation de T/ETP en fonction de la réserve en eau du sol, exprimée relativement à la réserve à la capacité au champ (R/R<sub>CC</sub>), dépend de l'espèce et rend compte de sa régulation stomatique. Pour la plantation (figure 2), le rapport T/ETP diminue suivant une courbe hyperbolique de 1 à 0,0,2, valeur correspondant à une réserve en eau du sol proche du point de flétrissement permanent (53% de R<sub>CC</sub>, soit 328 mm).



**Figure 2** : Relation entre la transpiration relative du peuplement transpiration/évapotranspiration potentielle, T/ETP) et la réserve en eau du sol (valeurs moyennes mensuelles du 17 février 1997 au 26 juillet 1999: (a) plantation d'Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL\*saligna*); (b) savane à *Loudetia arundinacea*.

La valeur moyenne de la saison des pluies (0,79, sol bien alimenté en eau,  $R \approx R_{CC}$ ) est proche de celle citée par George (1978) pour des peuplements identiques situés en Inde, âgés de 6 ans et dans des conditions similaires pour lesquels  $T/ETP=0,81$  (*Eucalyptus tereticornis*,  $P_i=1670$  mm an<sup>-1</sup>). Calder (1986) a étudié des peuplements d'*Eucalyptus saligna* âgés de 6 ans, au Brésil ( $P_i=1280$  mm an<sup>-1</sup>) pour lesquels  $T/ETP=0,84$ . Myers *et al.* (1996) ainsi que Honeysett *et al.* (1996) donnent une valeur T/ETP comprise entre 0,76 et 0,86 pour un peuplement d'Eucalyptus situé en Australie et en Tasmanie ayant un LAI de 2,8 à 3,1 (*Eucalyptus grandis*).

**La variation du rapport T/ETP** de la savane en fonction de l'état hydrique du sol (figure 2) est différente de celle de la plantation: T/ETP varie de façon linéaire en fonction de  $R/R_{CC}$ ; la valeur moyenne de T/ETP est de 0,61 pendant la saison des pluies ( $R$  proche de  $R_{CC}=363$  mm) et de 0,34 pendant la saison sèche ( $R$  proche de 51% de  $R_{CC}$ , soit 185 mm). Alors que l'on observe pour la plantation des valeurs nulles de T/ETP (pour  $R$  proche du  $R_{PPF}$ ), les valeurs les plus faibles observées pour la savane vont de 0,19 à 0,25. Et quelle que soit la réserve en eau du sol, pour une valeur donnée de cette réserve en eau du sol, la transpiration relative de la plantation est toujours supérieure à celle de la savane. On pourra qualifier le type de régulation stomatique de la plantation comme « peu marqué ». Lors de la saison des pluies des trois années étudiées, la plantation a évapotranspiré en moyenne 767 mm d'eau, soit une ETR moyenne journalière de 4,2 mm jour<sup>-1</sup>. Dye (1987) donne une valeur d'ETR de 4,7 mm jour<sup>-1</sup>, valeur moyenne journalière en saison des pluies, calculée sur 57 jours, pour un peuplement d'*Eucalyptus grandis* situé dans le Transvaal Oriental en Afrique du Sud ( $P_i=1250$  mm an<sup>-1</sup>, peuplement âgé de 6 ans, hauteur de 21,9 m, 725 arbres ha<sup>-1</sup>, LAI=4,23). Pendant les mêmes périodes, la savane a évapotranspiré 579 mm d'eau, soit une moyenne journalière de 3,2 mm jour<sup>-1</sup>. Lors de la saison sèche, l'ETR moyenne de la plantation et de la savane est respectivement de 183 et 121,5 mm (1,5 et 1 mm jour<sup>-1</sup>).

La validité des mesures d'ETR dépend du choix des stations qui doivent répondre aux exigences de l'application de l'équation de Penman-Monteith: un couvert dense et homogène d'une surface supérieure à 10.000 m<sup>2</sup>. La difficulté réside dans la possibilité de transferts horizontaux d'énergie, ce qu'a observé Sharma (1984) pour des plantations d'*Eucalyptus marginata* et *Eucalyptus calophylla* à l'ouest de l'Australie (avec  $P_i=1100$  mm an<sup>-1</sup>), pour lesquelles l'ETR a été supérieure à l'ETP à cause de transferts horizontaux d'énergie. Nous n'avons pas observé ce type de phénomène et enregistrons une très bonne corrélation entre l'ETR mesurée via l'équation de Penman-Monteith, celle obtenue par la méthode du bilan hydrique et celle provenant du rapport de Bowen (Nizinski *et al.* 2002).

L'évolution sur trois ans de la teneur en eau du sol en fonction de la profondeur (profils hydriques du sol) pour la plantation et la savane a permis de délimiter leur zone racinaire: la totalité de l'eau absorbée par ces deux écosystèmes provient des cinq premiers mètres de profondeur pour la plantation et des trois premiers mètres pour la savane. L'analyse des profils hydriques de la plantation rejoint les résultats des mesures de flux de sève effectuées dans la plantation d'Eucalyptus lors de la saison sèche de 1997: les arbres subissant un stress hydrique important (par exemple  $T=0,8$  mm jour<sup>-1</sup>,  $ETP=3,1$  mm jour<sup>-1</sup> et  $T/ETP=0,26$ ) ne prélèvent pas d'eau en deçà de cinq mètres de profondeur. Cette délimitation de la zone racinaire a une importance capitale dans la méthode employée et dans la précision d'appréciation de la quantité d'eau disponible pour chacun des deux écosystèmes. Dans la savane (tableau 2), il y a **drainage** en dehors de la zone racinaire lors des saisons des pluies

1997-98 et 1998-99. Si on cumule le drainage sur les trois années étudiées (0, 390 et 438 mm), on obtient un total de 827 mm. Dans la plantation (tableau 2), on retrouve les mêmes variations mais le drainage hors de la zone racinaire est moindre (0, 207 et 263 mm sur les trois années étudiées, soit un cumul de 470 mm). Lors de la saison des pluies 1996-97, il n'y a de drainage ni dans la plantation ni dans la savane; lors des saisons des pluies 1997-98 et 1998-99, le drainage dans la savane fut supérieur à celui de la plantation de respectivement 183 et 174 mm. Ces valeurs sont proches de celles obtenues en Afrique du Sud par Van Lill *et al.* (1980) pour des bassins versants qui étaient à l'origine couverts de savanes puis furent plantés d'Eucalyptus (zone avec précipitations incidentes annuelles de 1150 mm an<sup>-1</sup>): le boisement avec *Eucalyptus grandis* a réduit le ruissellement vers les cours d'eau de 340 mm cumulés sur trois ans ; ce ruissellement provenait du drainage, le boisement ayant donc réduit le drainage hors de la zone racinaire.

### 3.4. DURABILITE DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS

Chacun des deux écosystèmes ayant une ETR qui lui est propre, pour l'impact des Pi sur le bilan hydrique de ces deux écosystèmes, nous avons conçu la notion d'année déficitaire théorique. Si on compare l'ETR et le drainage de la plantation et de la savane en valeurs cumulées sur les trois années étudiées, l'ETR de la plantation est supérieure de 688 mm à celle de la savane et le drainage de la plantation est inférieur de 306 mm à celui de la savane : les plantations d'Eucalyptus pouvant être considérées comme d'anciennes savanes, le boisement de la savane avec des Eucalyptus augmente l'ETR et réduit le drainage. L'année déficitaire théorique, à savoir une année pour laquelle les précipitations incidentes de l'année (Pi) sont inférieures à l'évapotranspiration réelle moyenne annuelle, sont calculée sur les trois années étudiées (respectivement ETR<sub>96-99</sub>=1127 mm an<sup>-1</sup> pour la plantation et ETR<sub>96-99</sub>=821 mm an<sup>-1</sup> pour la savane).

Sur une période de quarante neuf ans (1949-98), le nombre d'années déficitaires théoriques est de dix-sept pour la plantation et de trois (1958, 1978 et 1989) pour la savane. Mais, si on considère maintenant la variable du « nombre d'années déficitaires théoriques successives », ce phénomène a eu lieu une fois pour la plantation pendant quatre années successives (1971 à 1974) mais aucune fois pour la savane. Lors de la saison des pluies 1996-97, année particulièrement déficitaire (Pi<sub>96-97</sub>=459 mm, soit 44 % de Pi<sub>50-98</sub>) et considérée comme une année déficitaire théorique, la plantation a évapotranspiré 740 mm. Cette hauteur d'eau correspond à la totalité des précipitations incidentes tombées lors de cette saison des pluies (Pi<sub>96-97</sub>=459 mm), à laquelle il faut ajouter 281 mm d'eau qui ont donc été prélevés dans la zone racinaire (de 5 m de profondeur), desséchant ainsi la zone racinaire vers la fin de la saison sèche 1997 (septembre) jusqu'au point de flétrissement permanent (52% de la réserve totale). L'analyse des profils hydriques rend bien compte de ces phénomènes. Dans le même temps, la savane a évapotranspiré 473 mm, ce qui correspond à seulement 14 mm prélevés dans la zone racinaire, à opposer aux 281 mm prélevés dans le cas de la plantation. A la fin de la saison sèche, le sol est au point de flétrissement permanent dans la plantation alors que dans la savane, il subsiste dans le sol une quantité d'eau qui représente 15 % de R<sub>RU</sub>, soit 27 mm (pour une zone racinaire de 3 m de profondeur). La plantation d'Eucalyptus est un écosystème artificiel qui absorbe/transpire toute l'année et qui consomme toute l'eau disponible. La succession de plusieurs années déficitaires se traduit par l'épuisement de la réserve en eau disponible dans le sol, épuisement dont on peut supposer qu'il entraîne une réduction de la production de bois de la plantation. Dans le cas de la savane, sachant qu'il subsiste 27 mm d'eau dans le sol à la fin de la saison sèche 1996-97, on peut imaginer le scénario d'autres années déficitaires succédant à une année du type 1996-97: les 27 mm seraient alors utilisés sans incidence sur la production de la savane. Sachant qu'entre 1950 et 1998, il n'y a eu qu'un seul épisode de quatre années déficitaires successives pour la plantation dans le bassin du

Kouilou, et que la durée de rotation d'une plantation est de sept ans, on peut supposer que ce type d'épisode « sec » ne compromet pas la survie des plantations, mais qu'il ne fait que réduire leur production. Dans le cas de la savane, il n'y a pas eu ce type d'épisode « sec » : la savane est l'écosystème naturel adapté au climat du Bas-Congo, caractérisé par une variabilité interannuelle des précipitations incidentes importante; ces conditions climatiques ont sélectionné un écosystème dont l'ETR est faible, plus faible que l'ETR d'une plantation d'Eucalyptus. L'aire de distribution naturelle du genre Eucalyptus s'étend entre 7° de latitude nord et 43°39' de latitude sud (Sadanandan et Brown, 1997): on peut classer les Eucalyptus en deux grands groupes, l'un « économe en eau » et l'autre « grand consommateur en eau ». Les clones étudiés *Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL\*saligna* appartiennent au second groupe et proviennent d'un hybride introduit de Java (zone tropicale humide avec des précipitations incidentes moyennes annuelles de 2030 mm an<sup>-1</sup>), à croissance rapide dont les feuilles ont une durée de vie courte (environ de 6-9 mois) et une régulation stomatique « peu marquée » ( $r_{smin}=3,5$  à  $5,9$  m s<sup>-1</sup> en saison des pluies). La durée de vie des feuilles des Eucalyptus de la station est d'environ 6-9 mois (Nizinski *et al.* 2002) et les résistances stomatiques minimales observées situent le peuplement étudié comme appartenant au groupe « grands consommateurs en eau ». Or, le climat du Bas-Congo est caractérisé par une variabilité interannuelle des précipitations incidentes importante (de  $Pi_{58}=296,0$  mm an<sup>-1</sup> à  $Pi_{60}=2045,3$  mm an<sup>-1</sup>). L'eau est un facteur limitant pour ces deux clones, néanmoins bien acclimatés au climat régional. On peut illustrer cette acclimatation par l'utilisation de l'hydromasse en saison sèche : les forestiers ont suivi l'accroissement de bois dans le massif d'Eucalyptus étudié à l'aide de colliers fixés sur les troncs d'arbres à 1,30 mètre du sol de 1992 à 1998, période pendant laquelle il n'y a qu'une année déficitaire (1996-97). Sur cette durée de sept ans, ils n'ont pas observé de diminution significative de la production de bois lors des saisons sèches. Si des capteurs plus fins (capteurs de déplacement) avaient été utilisés, nous aurions peut-être pu observer l'utilisation de l'hydromasse lors de ces saisons sèches (pour un peuplement de 24 m, l'hydromasse est d'environ 20 à 30 mm selon Granier, 1987). Si on « étale » ces 30 mm sur la saison sèche (juillet et d'août), on obtient une valeur de 0,5 mm jour<sup>-1</sup> à ajouter au flux de sève (mesuré à 1,30 m du sol) qui s'élève à 0,5 mm jour<sup>-1</sup> (valeur moyenne du 24 mai au 1 août 1997). Il est alors possible d'estimer une transpiration journalière d'environ 1 mm jour<sup>-1</sup>. Pour une ETP proche de 2 mm jour<sup>-1</sup> (saison sèche 1997), le rapport T/ETP serait alors de 0,5, situation proche du rapport optimum (T/ETP=0,79) et de la résistance stomatique minimale. L'utilisation de l'hydromasse en saison sèche évite donc ou modère, selon les années, la chute de production en saison sèche.

#### 4. CONCLUSION

La succession de plusieurs années déficitaires réduit la production de bois de la plantation, mais ne compromet pas sa survie compte tenu du type de rotation de ces plantations, premier élément positif pour conclure à la durabilité de ces plantations. Le boisement de la savane avec des plantations d'Eucalyptus réduit le drainage, la teneur en eau du sol des plantations étant globalement toujours inférieure à celle du sol de la savane. A long terme, cette faible teneur en eau induit-elle une modification des caractéristiques chimiques et biologiques du sol ? Une étude des sols et des bilans carboné et minéral des deux écosystèmes reste à faire pour déterminer ces aspects de la durabilité de ces plantations. Le boisement de la savane avec des plantations d'Eucalyptus augmente l'ETR. A long terme, y aura-t-il modification du climat local ou régional ? L'étude est à entreprendre dès maintenant pour déterminer cet autre aspect de la durabilité des plantations.

Les peuplements actuels dans le bassin du Kouilou couvrent 43.000 ha, les prévisions pour 2015 sont de 100.000 ha. Des études simultanées de la croissance et de la transpiration

devront permettre de sélectionner les clones favorisant des plantations durables. Sachant que l'eau est un facteur limitant de la production de bois des clones actuels, il faudrait étudier les réponses à l'alimentation en eau des clones choisis pour les futures plantations pour comparer (1) leur vitesse de croissance pour des conditions données d'alimentation en eau, (2) leur efficacité d'utilisation de l'eau, à savoir la quantité de matière sèche produite par unité de volume d'eau consommé, quelle que soit leur vitesse de croissance et, pour finalement sélectionner l'une ou l'autre de ces caractéristiques. Si on suppose qu'une ETR élevée modifiera le climat régional à long terme, les clones à l'origine de plantations durables ne devront pas nécessairement être les plus productifs en bois.

**Remerciements:** Cette étude a été financée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Les auteurs remercient Jean-Baptiste Diazenza, pour son aide sur le terrain.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

BEADLE C. L., NEILSON R. E., TALBOT R. E. & JARVIS P. G., 1995: Stomata conductance and photosynthesis in a mature Scots pine forest. I. Diurnal, seasonal and spatial variation in shoots. *Journal of Applied Ecology*, **22**, 557-571.

BOUILLET J.-P., LACLAU J.-P., NIZINSKI J. & NZILA J. D., 1999: La Fertilité des sols sous Eucalyptus : Impact des plantations autour de Pointe Noire (Congo). *Le Flamboyant*, **49** (3), 26-28.

CALDER I. R., 1986: Water use of Eucalyptus – a review with special reference to South India. *Agricultural Water Management*, **11**, 333-342.

DYE P. J., 1987: Estimating water use by Eucalyptus grandis with the Penman-Monteith equation. *Forest Hydrology and Watershed Management*, **167**, 329-337.

GAZARINI L. C., ARAUJO M. C. C., BORRAHLO N. & PEREIRA J. S., 1990: Plant area index in *Eucalyptus globulus* plantations determined indirectly by light interception method. *Tree Physiology*, **7**, 107-113.

GEORGE M., 1978: Interception, stemflow and throughfall in a Eucalyptus hybrid plantation. *Indian Forestry*, **104**, 719-726.

GRANIER A., 1987: Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap-flow measurements. *Tree Physiology*, **3**, 309-320.

HONEYSETT J. L., WHITE D. W., WORLEDGE D. & BEADLE C. L., 1996: Growth and water use of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* in irrigated and rainfed plantations. *Australian Forestry*, **59**, 64-73.

LACLAU J.-P., BOUILLET J.P. & RANGER J., 2000: La Fertilité des sols sous Eucalyptus : impact des plantations autour de Pointe-Noire (Congo). *Forest Ecology and Management*, **128**(3), 181-196.

MYERS B. J., THEIVEYANTHAN S., O'BRIEN N. D. & BOND W. J., 1996: Growth and water use of effluent-irrigated *Eucalyptus grandis* and *Pinus radiata* plantations. *Tree Physiology*, **16**, 211-219.

NIZINSKI J.-J., LOUMETO J.-J., AYOMA M.-B., MABIALA-N'GOMA A. & NSEMI R. N., 2002: Evapotranspiration réelle de la plantation d'Eucalyptus (bassin du Kouilou, Congo). *Annales de l'Université de Marien Ngouabi (Brazzaville)*, **3**, 10-24.

PENMAN H. L., 1948: Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass. *Proc. R. Soc. London, Ser. A.*, **193**, 120-145.

PINKER R. T., THOMPSON O. E. & ECK T. F., 1980: The albedo of tropical evergreen forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **106**, 551-558.

RIOU C., 1975: *La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale*. ORSTOM, Paris, 236 pages.

ROBERTS J. & ROSIER P. T. W., 1993: Physiological studies in young Eucalyptus stands in southern India and derived estimates of forest transpiration. *Agricultural Water Management*, **24**, 103-118.

ROBERTS J. M., ROSIER P. T. W. & MURTHY K. V. S., 1992: *Physiological studies in young Eucalyptus stands in southern India and their use in estimating forest transpiration*. In: Calder I.R., Hall R.L., Adlard P.G. (éditeurs), 'Growth and Water Use of Forest Plantations', Wiley, 226-243.

SADANANDAN N. E. K. & BROWN A. G., 1997: *Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests*. ACIAR Monograph n°43, 571 pages.

SHARMA M. L., 1984: Evapotranspiration from a Eucalyptus community. *Agricultural Water Management*, **8**, 41-56.

SMITH M. K., 1974: Throughfall, stemflow, and interception in pine and eucalypt forest. *Australian Forestry*, **36**, 190-197.

STEWART J. B., 1988: Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **43**, 19-37.

VAN LILL W. S., KRUGER F. J. & VAN WYK D. B., 1980: The effect of afforestation with *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden and *Pinus patula* Schlecht. et Cham. on streamflow from experimental catchments at Mokobulaan, Transvaal. *Journal of Hydrology*, **48**, 107-118.

VENNETIER P., 1968: *Pointe-Noire et façade maritime du Congo-Brazzaville*. Mémoires ORSTOM n°26, ORSTOM, Paris, 458 pages.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONEMENT AND DEVELOPMENT, 1987: Our common future. Oxford University Press, 323 pages

## 8. ÉTUDE ET MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VEGETAUX: CAS D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION (Nizinski et al. 2012<sup>16</sup>)

**Summary.** - *The evapotranspiration of grasslands and plantations.* In the models of the global change, the run of the general circulation of the atmosphere is dependent with the planetary distribution of the sources and sinks of energy; during balances, the transport of energy is carried out by the atmospheric air and the water of the oceans. The atmosphere must thus transport energy of the continents towards the oceans during the summer and oceans towards the continents during the winter.

The study of these phenomena on the continents uses the data relating to the studies of the actual evapotranspiration on a local level, level which is presented here. Recent models of actual evapotranspiration dissociate evaporation of the soil, canopy transpiration and interception, simulate the evolution of the structure of cover, stomatal resistances, factors which control the vapor water flux resistances and who govern balance between evaporation and transpiration.

Today for the mechanistic approach models, the difficulty of the choice of the income parameters arises most significant, more the problem of their initial state under given environmental conditions. The objective of this work is to point the interest of the use of the Penman-Monteith formula; this model fit well in the actual evapotranspiration phenomenon of the close covers (plantation) and can be adapted to the spars vegetation (herbaceous savannah with bare soils area) while treating separately leaf transpiration and bare soils evaporation.

The actual evapotranspiration of the herbaceous savannah differ from that of the plantations because it is limited by a boundary layer resistance who is of the same order of magnitude that surface resistance plotted to the stomata and leaf area index, whereas the actual evapotranspiration of plantations is only limited by surface resistance: the trees have stomata more sensitive to the drying of the air and soil that stomata of the herbaceous plants.

*Key-words:* Modelling, Penman-Monteith equation, Evapotranspiration, Surface resistance

**Résumé.** - 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 de l'énergie 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, niveau qui est présenté ici. Les modèles récents d'évapotranspiration d'un couvert dissocient évaporation du sol, transpiration du végétal et interception, simulent l'évolution de la structure du couvert, des résistances stomatiques, facteurs qui contrôlent les résistances au transfert 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. L'objectif de ce travail est de présenter l'intérêt de l'utilisation de la formule de Penman-Monteith; ce modèle permet de bien rendre compte de l'évapotranspiration de couverts végétaux fermés (plantation) et peut être adapté à des couverts non fermés (savane herbacée boisée avec surfaces de sol nu) en traitant séparément transpiration des feuilles et évaporation du sol nu.

---

<sup>16</sup> Nizinski J.J., Montoroi J.-P., Lointier M. & Braudeau E., 2012. Echanges de masse et d'énergie dans les couverts végétaux: cas d'une savane et d'une plantation. *La Météorologie* (soumis)

L'évapotranspiration des savanes herbeuses diffère de celle des plantations parce qu'elle est limitée par une résistance de couche limite qui est du même ordre de grandeur que la résistance du couvert liée aux stomates et à l'indice foliaire, alors que l'évapotranspiration des plantations est limitée seulement par la résistance du couvert: les arbres ont des stomates plus sensibles au dessèchement de l'air et du sol que les stomates des plantes herbacées.

*Mots-clés* : Modélisation, Equation Penman-Monteith, Evapotranspiration, Résistance du couvert.

## INTRODUCTION

Pour les modèles de l'évapotranspiration des couverts végétaux à vocation mécaniste, se pose le problème (a) du choix des paramètres d'entrée les plus significatifs; et (b) le problème de leur calage initial dans des conditions environnementales données (Perrier, 1976). L'objectif de ce travail est de présenter l'intérêt de l'utilisation de la formule de Penman-Monteith (Monteith & Unsworth, 1990); ce modèle permet de bien rendre compte de l'évapotranspiration de couverts végétaux fermés (plantation) et peut être adapté à des couverts non fermés (savane herbacée boisée avec surfaces de sol nu) en traitant séparément transpiration des feuilles et évaporation du sol nu.

L'évapotranspiration des savanes herbeuses diffère de celle des plantations parce qu'elle est limitée par une résistance de couche limite qui est du même ordre de grandeur que la résistance du couvert liée aux stomates et à l'indice foliaire, alors que l'évapotranspiration des plantations est limitée seulement par la résistance du couvert: les arbres ont des stomates plus sensibles au dessèchement de l'air et du sol que les stomates des plantes herbacées.

Dans cet article, pour l'estimation et la modélisation de l'évapotranspiration, l'échelle de temps choisie, 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 (1948) puis Monteith (1965) ont posé les bases physiques du calcul de l'évaporation d'une surface mouillée puis de l'évapotranspiration d'un couvert végétal fermé.

## THEORIE DES MESURES DE L'EVAPOTRANSPIRATION

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:

$$E_p = \frac{\frac{\Delta \cdot R_n}{\lambda} + \gamma \cdot Ea}{\Delta + \gamma} \quad [1]$$

Avec:  $E_p$ -évapotranspiration potentielle, en mm jour<sup>-1</sup>;  $\Delta$ -dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en kPa °C<sup>-1</sup> ( $\Delta = e_{s(t)} - e_{s(th)} / t - th$ ); avec:  $e_{s(t)}$ -pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface  $t$ , en kPa;  $e_{s(th)}$ -pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface humide  $th$ , en kPa;  $t$ -température de l'air, en °C;  $t_h$ -température humide de l'air, en °C);  $R_n$ -rayonnement net ou effectif, en W m<sup>-2</sup>;

$$R_n = R_g(1-g) + (R_a - R_t) \quad \text{et} \quad R_n = H + \lambda E + G_s \quad [2] \text{ et } [3]$$

Avec:  $R_g$ -rayonnement solaire global, en  $W m^{-2}$ ;  $R_a$ -rayonnement atmosphérique, en  $W m^{-2}$ ;  $R_t$ -rayonnement terrestre, en  $W m^{-2}$ ;  $g$ -réflectivité de la surface (fraction du rayonnement réfléchi pour une longueur spécifique);  $H$ -flux de chaleur sensible, en  $W m^{-2}$ ;  $\lambda E$ -flux de chaleur latente d'évaporation, en  $W m^{-2}$ ;  $G_s$ -flux de chaleur dans le sol, en  $W m^{-2}$ ;  $\lambda$ -chaleur latente de vaporisation, en  $J kg^{-1}$  ( $2451,8 J g^{-1}$ );  $\gamma$ -constante psychrométrique, en  $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$

$$\gamma = c_p P / \lambda (M_{EAU} / M_{AIR})$$

Avec:  $c_p$ -chaleur massique de l'air, en  $J kg^{-1}$  ( $1,012 J kg^{-1}$ );  $P$ -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  $kg mole^{-1}$  ( $29,10^{-3} kg mole^{-1}$ );  $E_a$ -évaporation d'une surface dont la température serait celle de l'air, mesurée sous abri, en  $mm jour^{-1}$ ;

$$E_a = 2,6 (e_{s(t)} - e_{a(t)}) (1 + 0,537 u_{2M}) \quad [4]$$

Avec:  $e_{s(t)}$ -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  $m s^{-1}$ .

Pour les surfaces présentant une très petite pente, uniformes et suffisamment étendues, 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:

Equation dite de Penman-Monteith (1965):

$$E_a = \frac{E_p}{\left( 1 + \left( \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) \cdot \left( \frac{r_{st}}{LAI \cdot r_a} \right) \right)} \quad [5]$$

Avec:  $E_a$ -évapotranspiration réelle, en  $mm jour^{-1}$ ;  $E_p$ -évapotranspiration potentielle, en  $mm jour^{-1}$ ;  $r_{st}$ -résistance stomatique d'une feuille, en  $s cm^{-1}$ ; LAI-indice foliaire du couvert, sans unité;  $r_a$ -résistance aérodynamique du couvert, en  $s cm^{-1}$ .

## LA RESISTANCE DE COUCHE LIMITE

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:

$$r_a = \frac{r_b}{LAI} + r_a(1)$$

[6]

et

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

[7]

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 RESISTANCE AERODYNAMIQUE

La résistance aérodynamique 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 ( $k_V$ ):

$$ra = \left( \frac{1}{(k2 \cdot u2m)} \right) \cdot \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z0} \right) \right]^2 \quad [8]$$

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), nous avons 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  $5,0 \text{ cm s}^{-1}$ ); pour les couverts arborescents (chênaie, plantation d'Eucalyptus et d'hévéa) nous avons calculé  $g_a$  à partir de la hauteur du peuplement :

$$d=0,75 h \quad \text{et} \quad z_0=0,1 h \quad [9] \quad \text{et} \quad [10]$$

Avec:  $d$ —hauteur de déplacement, en m;  $z_0$ —longueur de rugosité, en m;  $h$ —hauteur du peuplement, en m (de  $5,0 \text{ cm s}^{-1}$  à  $10,0 \text{ cm s}^{-1}$ ).

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. 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) nous avons 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 (Pi) pour le chêne en zone tempérée (forêt de Fontainebleau); les valeurs maximales de l'interception des bosquets (8,4 et 12,4 % Pi) sont du même ordre de grandeur que celle des zones herbacées de la savane sahélienne (7,5 % de Pi) et de la savane du littoral congolais (7 % de Pi).

## LA RESISTANCE DU COUVERT

La résistance du couvert dépend des résistances stomatiques des feuilles de ce couvert et de l'indice foliaire; 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: 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 nous avons travaillé répondent au 1<sup>er</sup> 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 nous avons 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 (1976) à partir des relations entre la résistance stomatique minimale d'une feuille, le potentiel hydrique des feuilles, le rayonnement global, le déficit de saturation de l'air et la réserve en eau du sol.

## LA RESISTANCE DU COUVERT

La résistance stomatique dépend de la *résistance stomatique minimale*, valeur remarquable correspondant à une situation de non contrainte hydrique (sol et plante) (Nizinski, 2007). La résistance stomatique minimale 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 nous avons observé sur les espèces que nous avons 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 nous avons étudiées sont caducifoliées, la période sans feuille étant la saison froide en zone tempérée et la saison sèche en zone tropicale nous avons 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. La période ( $LAI_{max}$  – valeurs minimale de  $r_{st-min}$ : chez *Quercus petraea* -  $LAI=100\%$ ;  $r_{st}=3,6\pm 0,9$  s  $cm^{-1}$ ;  $LAI=8\%$ ;  $r_{st}=8,7\pm 3,6$  s  $cm^{-1}$ ) (Nizinski & Saugier, 1989) est plus ou moins longue en fonction de l'espèce; par exemple chez le chêne, elle est très courte (deux à trois semaines). 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 (Nizinski & Saugier, 1988).

Pour estimer la **résistance du couvert**, on a commencé historiquement par supposer que toutes les feuilles étaient semblables (mêmes caractéristiques physiologiques, même microclimat)

- Katerji & Perrier (1985) 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 & Katerji (1991) 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 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:

Nous avons commencé par utiliser le modèle de Jarvis (1976) 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 (Nizinski *et al.*, 2009); cette dernière approche permet de faire une analyse déterministe de la résistance du couvert: la mesure de l'indice foliaire s'avère déterminante dans l'estimation de cette résistance.

## 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 (Perrier, 1976).

Il existe des modèles pour estimer le déficit de saturation de l'air à partir des caractéristiques de la couche limite planétaire, 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 mètre le jour).

## INFLUENCE DE L'INDICE FOLIAIRE DU COUVERT SUR L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE

Le rapport Transpiration/Evapotranspiration potentielle augmente avec l'augmentation de l'indice foliaire suivant une fonction  $1 - e^{-k \text{LAI}}$  où  $k$  représente le coefficient d'extinction de la lumière dans le couvert (Saugier, 1996).

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 sont donc essentielles. Nous illustrerons l'influence de l'indice foliaire sur l'évapotranspiration réelle à partir de deux situations: la chênaie tempérée, forêt caduque que nous avons suivie plusieurs années du débourrement jusqu'à la chute des feuilles, et la steppe sahélienne, végétation hétérogène.

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  $\text{LAI} = \text{LAI}_{\text{max}}$ , le début de la sénescence, de la chute des feuilles jusqu'à moment où l'indice foliaire s'annule. Avec deux variables d'entrée simples, la température moyenne de l'air et la photopériode, nous avons 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  $\text{LAI} = \text{LAI}_{\text{max}}$  et le moment où  $r_{\text{st-min}}$  atteint sa valeur minimale, l'évapotranspiration réelle atteint son maximum (en période de non contrainte hydrique) après  $\text{LAI} = \text{LAI}_{\text{max}}$  au moment où  $r_{\text{st-min}}$  est à sa valeur minimale pour le chêne environ un mois après que  $\text{LAI} = \text{LAI}_{\text{max}}$ . *Balanites aegyptiaca* offre un exemple d'adaptation à la sécheresse et nous allons récapituler ici 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 des feuilles il subsiste dans les horizons profondes (au-delà de 2,0 m de profondeur) une lame d'eau qui était disponible pour *Balanites aegyptiaca* mais qui n'a pas été utilisé (augmentation de la résistance stomatique, diminution de la transpiration).

Ensuite, il y a débourrement et croissance foliaire avant les pluies, 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<sup>e</sup>) supposons 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<sup>e</sup>) supposons que ce message est prioritaire par rapport au « message ABA » issu des racines puisque les feuilles se mettent en place alors que la réserve en eau des horizons supérieurs sont à la réserve au point de flétrissement permanent, dans une « configuration sol » identique à celle de la fin de la saison sèche. On peut se poser la question de l'avantage adaptatif de la mise en place des feuilles avant l'arrivée des pluies.

## L'INCIDENCE DE LA MODIFICATION DES COUVERTS SUR L'ÉVAPOTRANSPIRATION, CONCLUSION ET PERSPECTIVES

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. Notre étude au Sénégal de la steppe à *Acacia raddiana* et à *Balanites aegyptiaca* (Nizinski *et al.*, 1994) et notre étude au Congo de la savane à *Loudetia arundinacea* et des plantations d'Eucalyptus sur le littoral (Nizinski *et al.*, 2011) 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 la conductance aérodynamique pour laquelle il existe un facteur 2 entre les deux couverts (de 2,5 cm s<sup>-1</sup> à 5,0 cm s<sup>-1</sup> pour « l'herbacé » et de 5,0 cm s<sup>-1</sup> à 10,0 cm s<sup>-1</sup> 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<sup>e</sup> année, après la mise en défens 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; la 2<sup>e</sup> 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. Lean & Rowntree (1997) 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 notre. 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 nous avons 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*.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Messieurs les Professeurs Alain Perrier, Bernard Saugier et Pierre-Lucien Siband d'avoir suivi nos travaux depuis près de 30 ans.

## RÉFÉRENCES

- JARVIS, P.G. (1976). - The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, Series B, 273: 593-610.
- KATERJI, N. & PERRIER, A. (1985). - Détermination de la résistance globale d'un couvert végétal à la diffusion de la vapeur d'eau et de ses différentes composantes. Approche théorique et vérification expérimentale sur une culture de luzerne. *Agricultural Meteorology*, 34: 105-120.
- LEAN, J. & ROWNTREE P.R. (1997). - Understanding the Sensitivity of a GCM Simulation of Amazonian Deforestation to the Specification of Vegetation and Soil Characteristics. *Journal of Climate*, 10: 1216-1235.
- MONTEITH, J.L. (1965). - Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms. *Symosia of the Soc. Exp. Biol.*, New York, Academic Press, 19: 205-234.
- MONTEITH, J.L. & UNSWORTH, M.H. (1990). - *Principles of environmental physics*. (2<sup>nd</sup> ed.), Edward Arnold, London.
- NIZINSKI, J.J. (2007). - *Etude et modélisation du bilan des échanges de masse et d'énergie dans les couverts végétaux*. Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Orléans, Orléans.
- NIZINSKI, J.J. & SAUGIER, B. (1988). - A model of leaf budding and development for a mature *Quercus* forest. *Journal of Applied Ecology*, 25: 643-652.
- NIZINSKI, J.J. & SAUGIER, B. (1989). - A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 47: 1-17.
- NIZINSKI, J.J., MORAND, D. & FOURNIER, CH. (1994). - Actual evapotranspiration of a thorn scrub with *Acacia tortilis* and *Balanites aegyptiaca* (North Senegal). *Agricultural and Forest Meteorology*, 69: 93-111.
- NIZINSKI, J.J., GALAT-LUONG, A., GALAT, G., DINGKUHN, M. & FABRE, D. (2009). - Evapotranspiration réelle et résistance du couvert d'une savane à *Loudetia arundinacea* (bassin du Kouilou, Congo-Brazzaville). *Climatologie*, 6: 33-45.
- NIZINSKI, J.J., GALAT, G. & GALAT-LUONG, A. (2011). - Water balance and sustainability of Eucalyptus plantations in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). *Russian Journal of Ecology - Ekologiya*, 42: 40-50.
- PENMAN, H.L. (1948). - Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, Series A, 193: 120-145.

PERRIER, A, (1976). - *Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux: profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette*. Thèse d'Etat, Université de Pierre et Marie Curie, Paris VI.

SAUGIER, B. (1996). - Evapotranspiration des prairies et des cultures. *Comptes Rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 82 : 133-153.

SAUGIER, B. & KATERJI, N. (1991). - Some plant factors controlling evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54: 263-277.

## 9. ETUDE DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DES TRONCS D'HEVEA: CAS D'UNE PLANTATION EN COTE D'IVOIRE (Nizinski et al. 2012a<sup>17</sup>; Nizinski et al. 2012b<sup>18</sup>)

### Résumé

La nécrose de l'écorce de l'hévéa est une affection du tronc, s'exprimant par une altération des tissus corticaux au niveau desquels se situent les tissus conducteurs de latex.

Nous avons étudié les transferts hydriques dans des plantations en Côte d'Ivoire (mai et septembre 2004) dans une futaie d'hévéas (clone PB-260) plantée en janvier 1996, sur des individus « sains » et sur des individus « nécrosés ».

Les mesures de potentiel hydrique nous permettent d'apprécier les résistances le long du continuum racines – tronc – feuilles: les résistances au passage de l'eau entre le tronc et les feuilles sont les mêmes pour les individus « sains » et les individus « nécrosés »; les résistances au passage de l'eau entre les racines et le tronc différencient en revanche radicalement les deux types d'individus au niveau de la jonction de greffage; la résistance est exceptionnellement élevée pour les individus « nécrosés ».

Les résultats semblent montrer une différence de fonctionnement dans la régulation du flux transpiratoire entre individus « sains » et individus « nécrosés ». Les mesures ont été ici faites en conditions de disponibilité en eau optimales, il faudrait poursuivre ces mesures en conditions de stress hydrique pour la plante, on pourrait alors avoir des résultats plus contrastés.

**Mots-clefs:** *Hevea brasiliensis*, clone PB-260, Côte d'Ivoire, nécrose corticale, transpiration, conductivité hydraulique du tronc.

### Introduction

La nécrose de l'écorce de l'hévéa est une affection du tronc, s'exprimant par une altération des tissus corticaux au niveau desquels se situent les tissus conducteurs de latex (Nandris et al, 2004). Même dans le cas d'attaques très sévères, le cambium et le xylème demeurent fonctionnels. Compte tenu de la différenciation continue de cellules par l'assise cambiale, la couche de tissus laticifères nécrosés non fonctionnels est repoussée vers l'extérieur. Cette maladie touche essentiellement des arbres adultes en cours de saignée qui ne produisent alors plus de latex mais des cas de nécrose ont été observés sur de jeunes hévéas non exploités; il ne s'agit donc pas, comme pour l'encoche sèche, d'une maladie associée à la saignée.

De nombreuses observations suggèrent que le développement de la nécrose corticale est déclenché, ou accéléré, par une combinaison de facteurs chimio-physiques du milieu (stress liés au climat et au sol) et un traumatisme (mécanique et/ou métabolique) provoqué par les saignées. On peut également supposer une contribution de nature génétique (variabilité clonale, nette dans le cas de l'encoche sèche, moins nette pour la nécrose).

---

<sup>17</sup> Nizinski J.J., Galat-Luong A. & Galat G., 2012a. Etude de la conductivité hydraulique des troncs d'hévéa: cas d'une plantation en Côte d'Ivoire (1<sup>ère</sup> partie – Méthodes). *Geographia Technica*, n°1 – mars (sous presse)

<sup>18</sup> Nizinski J.J., Galat-Luong A. & Galat G., 2012b. Etude de la conductivité hydraulique des troncs d'hévéa: cas d'une plantation en Côte d'Ivoire (2<sup>ème</sup> partie – Résultats). *Geographia Technica*, n°2 – octobre (sous presse)

Des observations, qualitatives et quantitatives (Nizinski et al. 2005) semblent justifier l'hypothèse de l'association de la nécrose à une fermeture partielle des stomates et à potentiel hydrique plus négatif chez les arbres nécrotiques, indiquant un problème d'accès à l'eau (racines) ou de conduite de l'eau (xylème). Nous avons étudié les transferts hydriques dans des plantations d'hévéas en Côte d'Ivoire en considérant le sol, l'individu d'hévéa et l'atmosphère comme une entité physique dans laquelle les processus mis en œuvre pour la circulation de l'eau sont interdépendants (Philip, 1966). Nous avons mesuré les potentiels hydriques et les résistances au flux de sève brute au travers des racines, de la jonction de greffage, du tronc et des feuilles sur des individus « sains » et des individus « nécrosés ».

## Matériel et méthodes

*Situation géographique et climat:* la station d'étude se trouve au sud de la Côte d'Ivoire, le climat y est représentatif du climat général de la zone forestière humide. La migration d'air humide et instable (alizés australs, du sud au nord) débute en février – mars, il y a deux saisons des pluies caractérisées par une importante variabilité dans le temps et dans l'espace, d'avril à juin et de septembre à novembre, avec des précipitations moyennes annuelles de  $P_i=2065 \text{ mm an}^{-1}$ , une évapotranspiration potentielle (Penman, 1948) de  $1365 \text{ mm an}^{-1}$  ( $E_p=3,7 \text{ mm jour}^{-1}$ ), un rayonnement global moyen annuel journalier de  $18,4 \text{ MJ jour}^{-1}$ , une durée d'insolation moyenne journalière de 6,3 heures, une température moyenne de l'air de  $26,3 \text{ °C}$  ( $t_{\text{max}}=28,8 \text{ °C}$ ,  $t_{\text{min}}=23,7 \text{ °C}$ ), une humidité relative de l'air de 87,3 %, une vitesse moyenne du vent de  $95,8 \text{ km jour}^{-1}$  (station de référence Abidjan: latitude  $5^{\circ}15' \text{ N}$ , longitude  $3^{\circ}56' \text{ W}$ ; altitude 125 m; [www.fao.org](http://www.fao.org)). La période d'avril à juin correspond à la grande saison des pluies ( $P_i=712 \text{ mm}$ ; avec des précipitations moyennes annuelles de  $P_i=1723 \text{ mm an}^{-1}$ ; station météorologique de Bongo située sur la plantation). Nous avons fait les mesures d'une part pendant cette saison des pluies, en mai 2004 ( $P_i=146 \text{ mm mois}^{-1}$ ; avec un sol à la capacité au champ) et d'autre part en septembre qui correspond statistiquement à la fin de la saison sèche, avec juillet ( $P_i=175 \text{ mm mois}^{-1}$ ) – août ( $P_i=68 \text{ mm mois}^{-1}$ ) – septembre ( $P_i=87 \text{ mm mois}^{-1}$ ); mais en 2004 la 2<sup>e</sup> saison des pluies fut précoce et lors des mesures en septembre les pluies avaient déjà ramené le sol à la capacité au champ.

*Géologie et sols:* la zone d'étude se situe dans un bassin sédimentaire côtier (pliocène) comportant des grès argileux, des sables et des argiles. Les sols sont des sols ferrallitiques, légers, perméables en surface, pauvres en éléments minéraux du fait de la désaturation en bases du complexe absorbant des horizons A et B, acides ( $\text{pH}<6,0$ ).

*Végétation:* la végétation d'origine de Côte d'Ivoire est une forêt humide. Les surfaces défrichées sont transformées en cultures pérennes, plantations de palmier à huile, de caféier, de cocotier et d'hévéa. Le mot hévéa provient du terme indien « *hyévé* » qui désigne l'arbre à latex. Il a acquis une importance commerciale vers le milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle en Europe en raison des caractéristiques d'élasticité et d'imperméabilité de son latex qui, coagulé, fut appelé « caoutchouc ». L'hévéa appartient à la famille des Euphorbiacées comprenant 321 genres et 7.950 espèces dont de nombreuses dans la zone tropicale, en particulier en Inde, Malaisie et Amérique du Sud. Les feuilles sont caduques. La refoliation, associée à une élongation des tiges se fait immédiatement après la chute des feuilles qui a lieu de fin janvier à février. Les tiges et les feuilles de l'hévéa contiennent des tubes spécialisés qui sécrètent le latex, substance liquide laiteuse provenant de cellules laticifères réparties au niveau du cortex et orientées verticalement, et qui ont une longueur de plusieurs mètres (Kramer et Kozlowski, 1993). L'hévéa est d'introduction récente en Côte d'Ivoire. Le clone étudié, PB-260, a été créé entre 1955 et 1960 en Malaisie par pollinisation et a été classé comme clone à latex et à bois d'œuvre avec un tronc droit et régulier, ayant une croissance rapide avant saignement (5

ans). Les individus cultivés sont greffés, il existe donc « une jonction de greffage » chez ces individus.

|  |         |
|--|---------|
| Date de plantation                                     | 1996    |
| Clone  | PB-260  |
| Ecartement (en mètre)                                  | 6 x 4,0 |
| Hauteur moyenne des arbres (m)                         | 15,0    |
| Surface de la placette (hectare)                       | 25,70   |
| Nombre d'arbres  | 8558    |
| Nombre d'arbres (arbres ha <sup>-1</sup> )             | 333     |
| Surface du sol occupée par un arbre (m <sup>2</sup> )  | 30,03   |
| Circonférence à 1,3 m du sol (cm)                      | 59,57   |
| Diamètre du tronc à 1,3 m du sol (cm)                  | 18,96   |
| Surface terrière m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>       | 10,00   |
| Indice foliaire (LAI, m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ) | 3,24    |

**Tableau 2** - Caractéristiques morphologiques du peuplement de la station d'étude P20. *Morphological characteristics of the rubber tree plantation of the study plot P20* (Nizinski *et al.*, 2009)

*Individus d'hévéa étudiés*: Nandris *et al.* (2004) ont choisi en septembre 2003 pour le suivi des transpirations, potentiels et résistances, des individus « sains » et des individus « nécrosés », qu'il a associés par couple (un individu « sain » dénommé S; un individu « nécrosé » dénommé N); les deux individus de chaque couple sont proches l'un de l'autre, ont eu des conditions de croissance similaires et sont, au moment des mesures, dans des conditions similaires (lumière, ombre): il y a trois couples (S-N) au sein de la placette étudiée (photo 1).



**Photo 1** – Vue générale de la placette d'étude – P20: futaie d'hévéas (clone PB-260) plantée en janvier 1996 à l'état de plantules issues de boutures, plantules d'environ 0,3 m de hauteur, plantées en rangs orientés nord-sud avec un écartement de 4 m entre deux individus d'une même ligne et un écartement de 6 m entre deux lignes, avec comme paramètres: hauteur moyenne de 15 m; circonférence moyenne de 59,6 cm; densité de 333 arbres ha<sup>-1</sup>; surface terrière de 10 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>; volume de bois de 79,3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; indice foliaire de 3,2; zone racinaire de 4 m. *General sight of the study plot - P20: mature rubber trees plantation (clone PB-260) were planted in Janvier*

1996 with transplants (0.3 m height) in pits dug at a spacing of 4 m x 6 m (rows facing Nord-South); mean height 15 m; mean stem diameter at 1.3 level 0.17 m (59.6 cm); stand density 333 trees ha<sup>-1</sup>; total basal area 10 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>; total wood production 79.3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; mean annual leaf area index 3.2; rooting depths 4 m

Caractéristiques qualitatives de la surface d'aubier: nous ferons référence à une étude faite à Abourra (Ghana) en mars 2003 pour laquelle nous avons utilisé la méthode suivante: quatorze individus, sept sains et sept nécrosés ont été choisis, pour leur circonférence proche de la circonférence moyenne, et abattus. Nous avons prélevé pour chaque individu, une section de tronc (billot) d'une épaisseur d'environ 8 cm, incluant la jonction de greffage qui a été immédiatement placée dans une solution de Phoxine B® à 0,5 cm<sup>3</sup> dm<sup>-3</sup>. Ce colorant rouge migre dans les vaisseaux conducteurs fonctionnels et atteint en quelques minutes l'autre extrémité, en délimitant de manière bien visible la zone conductrice. Nous avons photographié les surfaces supérieures des billots tâchés de Phoxine B®, après 1, 5, 30 et 60 minutes. Les photographies ont été scannées, les surfaces d'aubier colorées ont été planimétrées à l'aide du logiciel « SigmaScanPro5® ». La comparaison des surfaces « tâchées » par la Phoxine B® a permis une première discrimination qualitative des résistances au transfert du flux de sève brute à travers la jonction de greffage.

Indice foliaire: on rendra compte de la surface des feuilles et de leur distribution par l'indice foliaire, surface totale des feuilles divisée par la surface du sol recouvert par celles-ci, obtenu par mesures indirectes qui consiste à comptabiliser le nombre de feuilles de l'année (litière fraîche) récoltées à l'aide d'une aiguille, utilisée perpendiculairement au sol, chaque mesure étant répétée 300 fois.

Évapotranspiration potentielle du couvert et transpiration d'individus « sains » et d'individus « nécrosés »: les formules de Penman (1948) et de Monteith (1965) ont été utilisées pour estimer l'évapotranspiration potentielle (E<sub>p</sub>) et l'évapotranspiration réelle du couvert (E<sub>a</sub>). Nous avons utilisé les données météorologiques de la station installée à environ cinq kilomètres des peuplements étudiés (photo 2a et 2b). Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle et réelle ont été calculées chaque vingt minute, puis cumulées sur les durées correspondant aux intervalles de mesures des potentiels et des résistances.

$$E_p = (\Delta R_n / (\lambda + \gamma E_0)) / (\Delta + \gamma) \quad (\text{mm jour}^{-1}) \quad [1]$$

Pour estimer l'évapotranspiration réelle du couvert, nous avons utilisé la formule de Penman - Monteith, soit:

$$E_a = E_p / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_{s(\text{moy})} / \text{LAI}_{P20} r_a)) \quad (\text{mm jour}^{-1}) \quad [2]$$

Avec : r<sub>s(moy)</sub> - résistance stomatique moyenne d'une feuille (valeurs mesurées), en s cm<sup>-1</sup>; LAI<sub>P20</sub> - indice foliaire du couvert (valeurs mesurées); LAI=3,24 ; r<sub>a</sub> - résistance aérodynamique du couvert, en s cm<sup>-1</sup> (Monteith, 1965):

$$r_a = (1 / (k^2 u_{2M})) (\ln(z-d) / z_0)^2 \quad (\text{s cm}^{-1}) \quad [3]$$

Avec: r<sub>a</sub> - résistance aérodynamique, en s cm<sup>-1</sup>; k - constante de von Karman (0,39); u<sub>2M</sub> - vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol, en m s<sup>-1</sup>; z - niveau considéré, en m; z<sub>0</sub> - longueur de rugosité, en m; d - hauteur du déplacement, en m (Thom, 1972).

$$d = 0,75 h \quad \text{et} \quad z_0 = 0,1 h \quad (\text{m}) \quad [4] \quad \text{et} \quad [5]$$

Avec : h - hauteur du peuplement, en m

$$Tr = \Sigma Tr_{(i)} * S_{(i)} / N / 3 \quad (\text{dm}^3 \text{ heure}^{-1} \text{ arbre}^{-1}) \quad [6]$$

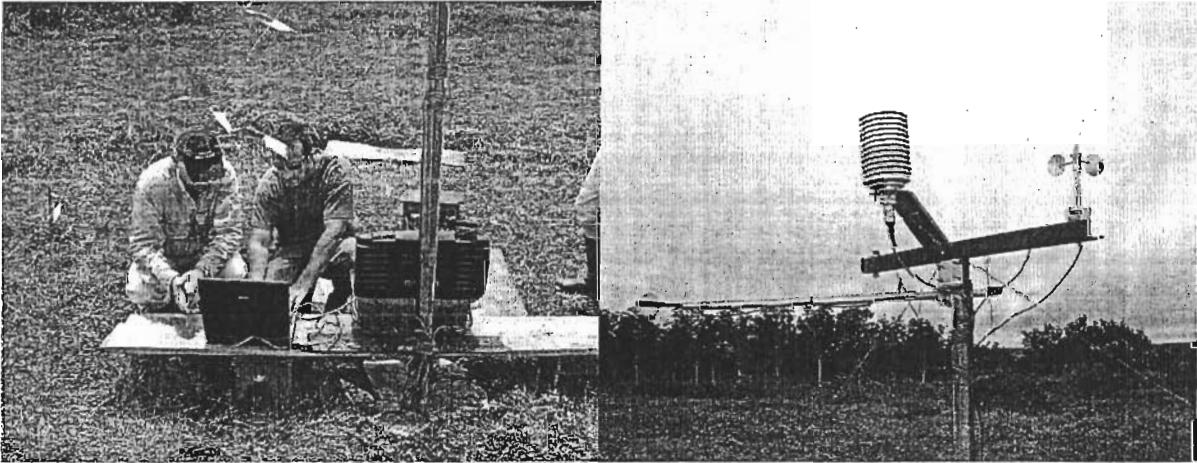
Avec

$$Tr_{(i)} = E_p / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_{s(\text{moy})} / LAI_{P20} r_a)) \quad (\text{mm jour}^{-1}) \quad [7]$$

et

$$S_{(i)} = S_{P20} / N_{P20} \text{ donc pour } S_{P20} = 30,03 \quad (\text{m}^2 \text{ arbre}^{-1}) \quad [8]$$

Avec:  $Tr_{(i)}$  - transpiration d'individu (i) au sein d'une placette P20, mm jour<sup>-1</sup>;  $r_{s(\text{moy})}$  - résistance stomatique moyenne d'une feuille d'individu (i), en s cm<sup>-1</sup>;  $S_{(i)}$  - surface du sol occupée par un individu (i) au sein d'une placette P20, en m<sup>2</sup>;  $S_{P20}$  - surface de la placette P20 (P20= 25,7 ha), en hectares;  $N_{P20}$  - nombre d'arbres présents sur la placette P20 ( $A_{P20}$ = 8558 arbres); 3 - nombre des scrutations par heure (3 x 20 minutes); i – appellation des individus, individus «sains» (S17, S16, S18) et individus «nécrosés» (N1, N2, N3).



**Photo 2ab** – Station météorologique du site d'étude (mesures à 2 m au-dessus de la surface du sol: capteur de photons (Licor Quantum Sensors®), humidité relative de l'air et température moyenne de l'air (sonde Vaisala, HMP35AC®), vitesse du vent (anémomètre Vector®), rayonnement global (pyranomètre Li-200SZ®) et rayonnement net (bilan mètre REBS/Q-7®); température moyenne du sol à 0,05 m et 0,15 m (sonde 107®); les mesures sont stockées sur une centrale d'acquisition de données de type Micrologger CR10 X®. *Meteorological data issued from the meteorological station located about 5 km from (2 m above the savannah's soil surface): Photosynthetically Active Radiation (PAR) (quantum sensor; Li-cor®, NE, USA), air humidity, mean air temperature (R.H. probe, Vaisala HMP35AC®, Helsinki, Finland), wind speed (anemometer A100R, Vector Instruments®, Rhyl, UK), global radiation (pyranometer Li-200SZ, Li-cor®, NE, USA) and net radiation (net radiometer REBS/Q-7, Campbell®, Logan, USA); soil temperatures (at 0.05 m and 0.15 depth; 107 probes, Campbell®, UK) were recorded on a CR10 X Datalogger (Campbell®, Logan, USA)*

Conductivité hydraulique des troncs - absorption racinaire: conductivité hydraulique des troncs il s'agit du flux de sève transitant par un segment de tronc par unité de temps et par unité de gradient de potentiel (sans spécifier le diamètre du tronc) (Cruiziat et Tyree, 1990), à savoir:

$$k_h = Tr / (\Delta\Psi / l) \quad (\text{cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1} \text{ arbre}^{-1}) \quad [9]$$

Avec:  $k_h$  - conductivité hydraulique, en cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O s<sup>-1</sup> bars<sup>-1</sup> arbre<sup>-1</sup>; Tr – transpiration, en cm<sup>3</sup>;  $\Delta\Psi$  - différence de potentiel entre deux points de mesure de potentiel, en bars; l – longueur du segment de tronc, en cm.

Dans nos conditions expérimentales les quantités d'eau transpirées (Tr) quotidiennement par l'hévéa sont celles absorbées par les racines (Abs), le flux d'eau à travers l'hévéa pouvant être considéré comme conservatif (Philip, 1966), soit:  $Abs \approx Tr$ .

Par simplification, nous réduisons l'hévéa à trois compartiments: le compartiment « feuilles », le compartiment « tronc » qui est le greffon, le compartiment « racines » qui est le porte-greffe; la jonction de greffage délimite physiquement deux portions du tronc réel mais dans notre schéma de compartiments, elle délimite le compartiment « racines » et du compartiment « tronc »:

$$Abs = (\Psi_{sol} - \Psi_{racines}) / r_{sol-racines} = (\Psi_{racines} - \Psi_{tronc}) / r_{racines-tronc} = (\Psi_{tronc} - \Psi_{feuilles}) / r_{tronc-feuilles} = Tr_{(i)} \quad [10]$$

Ainsi: Abs – absorption racinaire, en  $cm^3 H_2O \text{ arbre}^{-1} s^{-1}$ ;  $\Psi_{sol}$  – potentiel hydrique du sol, en bars;  $\Psi_{racines}$  – potentiel hydrique des racines (porte greffe), en bars;  $\Psi_{tronc}$  – potentiel hydrique du tronc (greffon), en bars;  $\Psi_{feuilles}$  – potentiel hydrique des feuilles, en bars; Tr - transpiration en  $cm^3 H_2O \text{ arbre}^{-1} s^{-1}$ ;  $r_{sol-racines}$  – résistance au passage de l'eau du sol aux racines, en  $cm^3 H_2O s^{-1} bars^{-1}$ ;  $r_{racines-tronc}$  – résistance au passage de l'eau des racines (porte greffe) au tronc (greffon) à travers la jonction de greffage, en  $cm^3 H_2O \text{ arbre}^{-1} s^{-1} bars^{-1}$ ;  $r_{tronc-feuilles}$  – résistance au passage de l'eau à travers du bas du tronc (greffon) aux feuilles, en  $cm^3 H_2O \text{ arbre}^{-1} s^{-1} bars^{-1}$ .

### Dispositif expérimental (tableau 1)

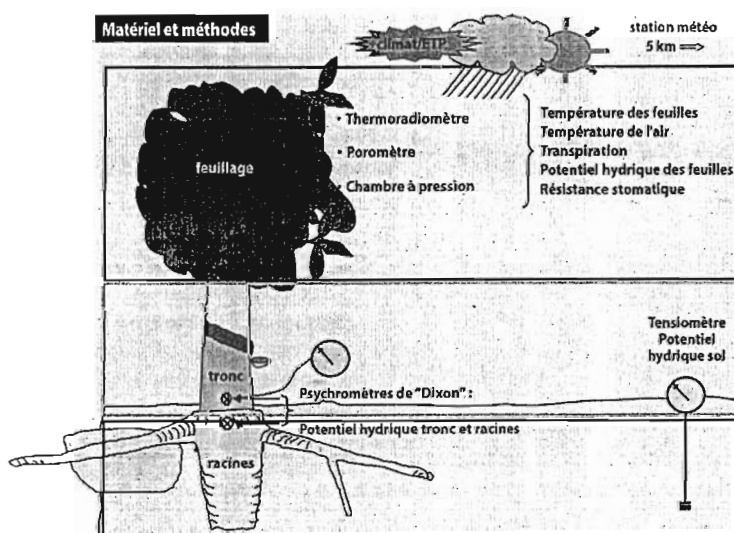


Tableau 1 - Matériels et méthodes utilisés lors de missions en Cote d'Ivoire en 2004.

*Les poromètres* permettent de mesurer les échanges gazeux entre la feuille et l'atmosphère (photos 3a, 3b et 3c). Ces flux sont proportionnels à la surface de l'objet, aux gradients de concentration du gaz entre l'intérieur et l'extérieur de la feuille, et à la conductivité ( $=1/\text{résistance}$ ) de l'objet. Dans les systèmes ouverts, un flux d'air constant et de concentration en vapeur d'eau connue entre dans la chambre où se situe la feuille, la concentration en vapeur d'eau sortante est ensuite mesurée. Il est alors possible de calculer la transpiration et la résistance stomatique. Les mesures ont été faites entre 10h30 et 15h30 car, compte du type d'appareil utilisé (poromètre AP4, Delta-T-Devices®), l'humidité relative de l'air, très élevée (plus de 80 %), a empêché toute mesure avant 10h30 et après 15h30. Cette

humidité relative se maintenant élevée au cours de la journée (de 70 à 80 %), nos mesures de résistance stomatique approchent la résistance stomatique minimale.



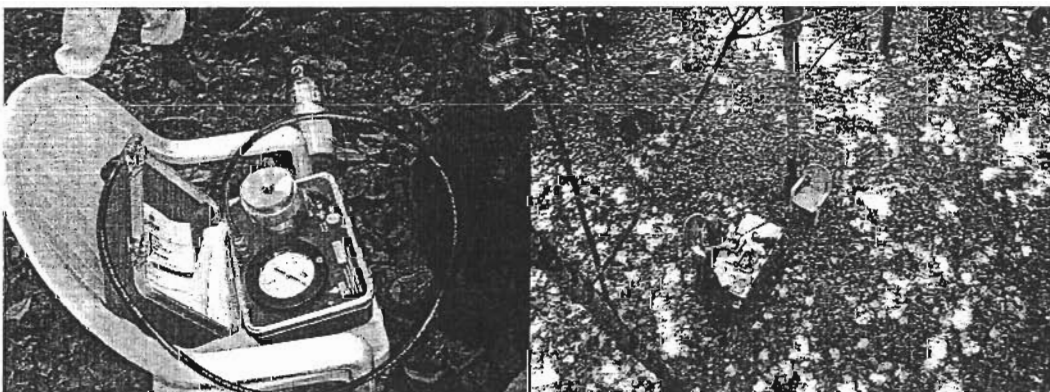
Photo 3abc – Mesures de la résistance stomatique ( $r_{\text{stomatique}}$ , en  $\text{s cm}^{-1}$ ) avec un poromètre de type AP4, Delta-T-Devices®.

Le radio thermomètre (photo 4): la réduction de transpiration d'une feuille due à un accroissement de la résistance stomatique, diminue le flux de chaleur latente d'évaporation et augmente le flux de chaleur sensible, avec accroissement de la température. La température d'une feuille dépend de l'état hydrique du couvert végétal, des conditions microclimatiques, des conditions de plantation, des conditions de mesure, de l'âge de la feuille, de son éclaircissement, de ses conditions de croissance, de sa localisation sur la branche. Nous avons adopté un échantillonnage prenant en compte cette variabilité. Nous avons mesuré à l'aide d'un radio thermomètre DTMX de Raytek® la température de dix feuilles de chacun des individus étudiés. Les mesures ont été effectuées sur la partie supérieure de la feuille à une distance d'environ 0,3 m. De façon synchrone la température de l'air environnant les feuilles a été mesurée avec un thermocouple couplé au radio thermomètre. Les mesures débutaient le matin après évaporation de l'eau de rosée présente sur la feuille et s'achevaient au coucher du soleil. Nous n'avons pas eu de période de pluie.



**Photo 4** - Mesure de la température des feuilles à l'aide d'un thermo radiomètre ( $T_{\text{feuilles}}$ , en °C) de type DTMX de Raytek®. *Measurement of the leaf and air temperature with DTMX de Raytek® radio thermometer (measurement error  $\pm 0.3$  °C)*

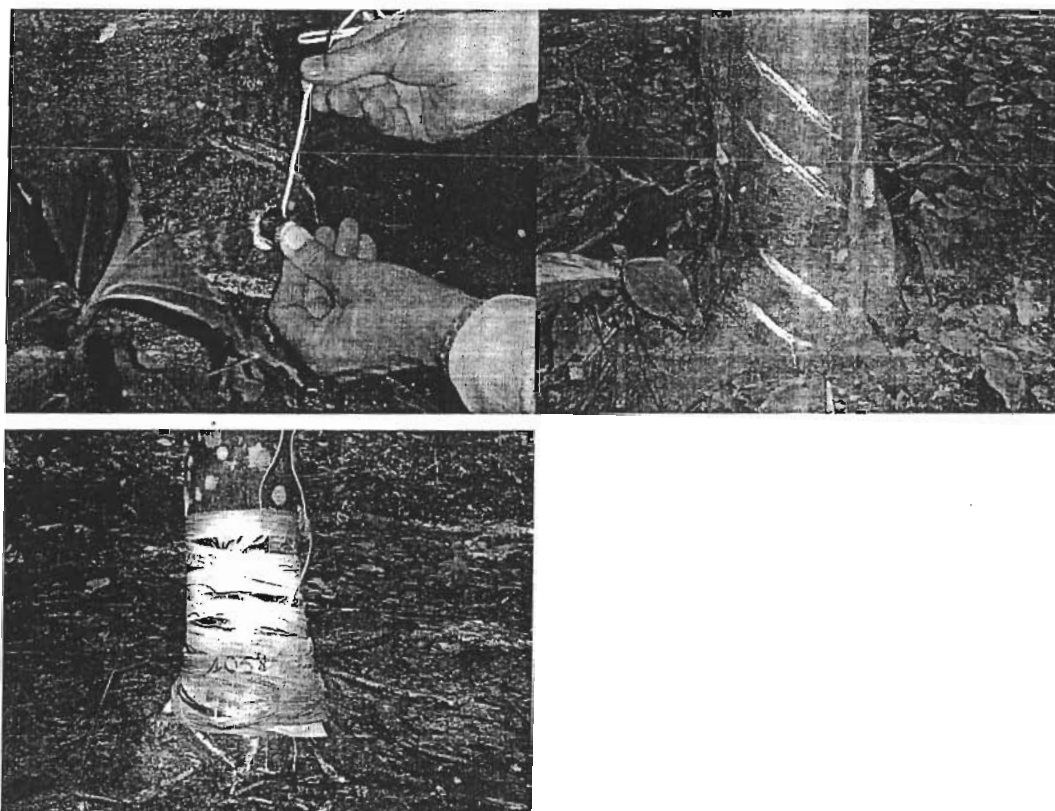
La chambre à pression (photos 5a et 5b): La feuille est séparée de la branche au moyen d'une lame de rasoir, à la base du pétiole et introduite dans la chambre à pression. Celle-ci mesure la pression hydrostatique négative dans le pétiole de la feuille à partir de l'équilibre entre la pression hydrique de la feuille et la pression de l'air de la chambre (Ritchie et Hinckley, 1975), équilibre qui se manifeste pour l'observateur par l'apparition de la sève sur la coupure du pétiole, observée à la loupe. Nous avons utilisé la chambre à pression mise au point par la S<sup>t</sup>e PMS Instrument® ; cette chambre est portable et alimentée par une bouteille d'azote (précision des mesures  $\pm 0,5$  bars).



**Photo 5ab** - Mesure du potentiel foliaire ( $\Psi_{\text{feuilles}}$ , en bars) avec une chambre à pression PMS®. *Measurement of the leaf water potential with a PMS® pressure chamber*

Le micro-psychromètre (photos 6a, 6b et 6c): mesure le potentiel du xylème (micro psychromètre Stem Psychrometer, Plant Water Status®) (Dixon, 2004). Il est relié à un

microvoltmètre à point de rosée Wescor HR-33T® (Nizinski *et al.*, 2010). Deux cellules sont appliquées au niveau du tronc à deux hauteurs dans le but d'estimer la résistance au transfert de la sève. *Principe*: l'appareil utilise le principe du refroidissement par effet Peltier. La mesure s'effectue en trois temps: (1<sup>er</sup>) mesure de la température de l'air ambiant; (2<sup>ème</sup>) refroidissement par effet Peltier de l'air emprisonné dans les deux cellules jusqu'au point de condensation, puis détermination de la quantité de vapeur d'eau du volume d'air des deux cellules; (3<sup>ème</sup>) mesure de la force électromotrice (f.e.m) générée par l'évaporation de la goutte d'eau issue de la condensation. Le passage de la valeur de la force électromotrice à la valeur de potentiel se fait par une courbe-étalon d'équation:  $f.e.m. = a\Psi + b$  ( $\Psi_{racines}$  ou  $\Psi_{tronc}$ ).



**Photo 6abc** - Mesure du potentiel hydrique du xylème ( $\Psi_{racines}$  et  $\Psi_{tronc}$ , en bars) avec micro psychromètre Stem Psychrometer, Plant Water Status®. *Setting of the micro-psychrometer of Dixon-Tyree® into level of the grafting junction for measurements of xylem water potential ( $\Psi_{stem}$  and  $\Psi_{root}$ ; bars) (Nizinski *et al.*, 2010)*

Le tensiomètre (photos 7a et 7b): mesure le potentiel hydrique du sol. La mesure consiste à placer une bougie poreuse saturée en eau dans le sol. Cette bougie est reliée à un manomètre par un circuit hydraulique étanche. Le sol va engendrer une succion au niveau de la bougie qui se traduit par un transfert d'eau de celle-ci vers le sol avec chute de pression hydrostatique dans le circuit hydraulique mesurée par le manomètre. Les bougies poreuses sont placées dans le sol dans l'environnement proche des individus sains et nécrosés. Les mesures sont effectuées à des pas de temps identiques, pour tous les jours de prises de données, pour la profondeur 40-60 cm.



Photo 7ab – Mesures du potentiel hydrique du sol ( $\Psi_{sol}$ , en bars) avec un tensiomètre de type SMS 2500 - SDEC®. Measurement of the soil-water potential with a SMS 2500, SDEC® tensiometers

## Résultats et discussion

### Paramétrisation du sol et du couvert végétal

Pour comparer nos mesures à celles d'autres travaux, nous avons paramétré la station d'étude, ces paramètres intervenant dans les modèles mathématiques d'estimation de la transpiration des individus « sains » et « nécrosés », à savoir: le nombre d'arbres par hectare, la circonférence des arbres, la surface terrière des placettes d'études, l'indice foliaire, la hauteur moyenne du peuplement, présentés dans le tableau 2 (photo 1) et comparables aux paramètres obtenus par Monteny (1987).

Les profils d'humidité et de potentiel hydrique du sol ont été établis chaque jour de mesure sur une profondeur de 1,2 m, profondeur correspondant à la quasi-totalité du système racinaire de l'hévéa, qui peut atteindre 4 m. Ces profils ont été établis respectivement pour les individus « sains » et les individus « nécrosés »: ces profils sont identiques, la réserve utile en eau du sol pour les deux types d'individus est donc la même. Pour l'ensemble de la zone racinaire les teneurs en eau ont toujours été proches de la capacité au champ,  $R_{CC} = 412$  mm, soit un potentiel hydrique du sol de  $\Psi_{sol} = -0,1$  bars (tableau 2) et sont comparable aux valeurs mentionnées par Monteny (1987) concernant des sols ferrallitiques apparentés aux nôtres, formés sur sable, à Oursou, Côte d'Ivoire et plantés d'hévéas.

| Résultats de mai 2004 |                         | grandeurs mesurées | 2 individus sains | 3 individus nécrosés | différence | significatif |
|-----------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------|--------------|
| feuillage             | $T_s$ (°C)              |                    | 27,9              | 28,0                 | 0,1        | NS           |
|                       | $T_{air}$ (°C)          |                    | 27,1              | 27,1                 | 0,0        | NS           |
|                       | $r_s$ ( $ls\ cm^{-1}$ ) |                    | 1,2               | 1,8                  | 0,6        | S            |
|                       | $\Psi_l$ base (bars)    |                    | -3,2              | -3,6                 | 0,4        | NS           |
|                       | $\Psi_l$ moy/jour       |                    | $-6,0 \pm 0,91$   | $-8,6 \pm 1,40$      | 2,6        | S            |
| tronc                 | $\Psi_l$ base (bars)    |                    | -4,1              | -4,1                 | 0,0        | NS           |
|                       | $\Psi_l$ moy/jour       |                    | $-4,6 \pm 0,87$   | $-5,6 \pm 1,32$      | 1,0        | S            |
| racines               | $\Psi_l$ base (bars)    |                    | -4,1              | -4,1                 | 0,0        | NS           |
|                       | $\Psi_l$ moy/jour       |                    | -3,9              | -4,2                 | 1,0        | NS           |
|                       | $\Psi_{sol}$ (bars)     |                    | -0,1              | -0,1                 | 0,0        | NS           |

| Résultats de septembre 2004 |                         | grandeurs mesurées | 5 individus sains | 5 individus nécrosés | différence | significatif |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------|--------------|
| feuillage                   | $T_s$ (°C)              |                    | 26,6              | 26,5                 | 0,1        | NS           |
|                             | $T_{air}$ (°C)          |                    | 26,0              | 26,0                 | 0,0        | NS           |
|                             | $r_s$ ( $ls\ cm^{-1}$ ) |                    | $1,6 \pm 0,49$    | $2,8 \pm 0,53$       | 1,6        | S            |
|                             | $\Psi_l$ base (bars)    |                    | -3,8              | -3,4                 | 0,4        | NS           |
|                             | $\Psi_l$ moy/jour       |                    | $-6,1 \pm 1,04$   | $-7,4 \pm 1,35$      | 1,3        | S            |
| tronc                       | $\Psi_l$ base (bars)    |                    | -4,0              | -4,0                 | 0,0        | NS           |
|                             | $\Psi_l$ moy/jour       |                    | $-5,6 \pm 1,09$   | $-7,2 \pm 0,57$      | 1,2        | S            |
| racines                     | $\Psi_l$ base (bars)    |                    | -4,4              | -4,0                 | 0,4        | NS           |
|                             | $\Psi_l$ moy/jour       |                    | $-4,9 \pm 0,09$   | $-5,2 \pm 1,10$      | 0,3        | NS           |
|                             | $\Psi_{sol}$ (bars)     |                    | -0,1              | -0,1                 | 0,0        | NS           |

Tableau 3 - Plantation d'hévéas des individus « sains » (S16-S17-S18) et « nécrosés » (N1-N2-N3) à Bongo, placette d'étude: résistance stomatique ( $r_{stomatique}$ ); potentiel hydrique moyen journalier des feuilles ( $\Psi_{feuilles}$ ); potentiel hydrique moyen du xylème (des troncs et des racines) ( $\Psi_{tronc}$  et  $\Psi_{racines}$ ) et potentiel hydrique du sol ( $\Psi_{sol}$ ) mesuré (a) lors de la période du 11 au 22 mai 2004; (b) du 5 au 18 septembre 2004. Rubber tree plantation in Bongo, study plot – stomatal resistance ( $r_{stomat}$ ), mean daily leaf and xylem water potential of stem and root

( $\Psi_{stem}$  and  $\Psi_{root}$ ) of the « healthy » (S16-S17-S18) and of « necrosed » trees (N1-N2-N3) during the period (a) from 11 to 22 May and (b) from 5 to 18 September 2004

Pour chaque feuille, nous avons une cinétique de la température de la feuille ( $T_f$ ), de l'air et de la différence de température entre la feuille et l'air. Nous avons obtenu respectivement pour les individus « sains » et les individus « nécrosés » en mai  $T_f = 27,9$  et  $28,0$  °C ( $T_a = 26,0$  °C) et en septembre  $T_f = 27,9$  et  $28,0$  °C ( $T_a = 27,1$  °C), soit en mai une température des individus « sains » inférieure de  $0,1$  °C à celle des individus « nécrosés » et en septembre une température des individus « sains » supérieure de  $0,1$  °C à celle des individus « nécrosés » (tableaux 3 ab) du couvert d'hévéas. Les mesures ont été faites en saison des pluies, avec une couverture nuageuse maximale et une température minimale. Cette différence de température est inférieure à la précision de l'appareil (différence minimale de  $0,3$  °C). On ne peut donc pas conclure à une différence de température de surface entre les deux types d'individus.

**Flux de vapeur d'eau, potentiels et résistances dans le système sol – plante - atmosphère**  
Evapotranspiration potentielle du couvert et transpiration des individus « sains » et des individus « nécrosés »: les caractéristiques morphologiques du peuplement étant les mêmes pour les deux types d'individus, l'évapotranspiration potentielle est la même pour tout le peuplement, elle représente l'énergie maximale pouvant être dissipée sous forme de chaleur de vaporisation de l'eau. L'évapotranspiration potentielle, moyenne journalière du couvert d'hévéas sur 18 jours, du 5 au 13 mai et du 7 au 25 septembre 2004, issue de l'équation de Penman (1948) est de  $3,6$  mm jour<sup>-1</sup>, valeur comparable à celle mentionnée par Monteny (1987) pour la même région ( $3,5$  mm jour<sup>-1</sup>). L'évapotranspiration potentielle suit les variations de rayonnement au-dessus du couvert. Pour une parcelle bien irriguée et dense, le flux de chaleur sensible sera quasiment nul, l'énergie reçue à la surface du sol est utilisée dans le flux de chaleur latente de vaporisation de l'eau. Le maximum d'évapotranspiration potentielle se situe entre 12h et 15h avec des valeurs comprises entre  $13,5$  et  $15,6$  dm<sup>3</sup> arbre<sup>-1</sup> heure<sup>-1</sup>, quand le rayonnement est le plus important, la température de l'air la plus forte (jusqu'à  $37$ °C), le déficit de saturation de l'air maximal et l'humidité relative minimale (63 %).

| Résultats de mai et septembre |  | grandeurs mesurées   | 6 individus sains | 6 individus nécrosés | différence | significatif |
|-------------------------------|--|--|-------------------|----------------------|------------|--------------|
|                               |  | Transpiration en cm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O s <sup>-1</sup>  | 1,9 ± 0,11        | 1,4 ± 0,31           | 0,5        | S            |
|                               |  | Conductance du tronc aux feuilles, en cm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O s <sup>-1</sup> bars <sup>-1</sup>    | 0,3 ± 0,17        | 0,2 ± 0,18           | 0,1        | NS           |
|                               |  | Conductance des racines aux feuilles, en cm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O s <sup>-1</sup> bars <sup>-1</sup> | 0,6 ± 0,08        | 1,6 ± 0,11           | 1,0        | S            |
|                               |  | Conductance des racines au tronc, en cm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O s <sup>-1</sup> bars <sup>-1</sup>     | 0,2 ± 0,06        | 1,1 ± 0,31           | 0,9        | S            |

Tableau 4 - Plantation d'hévéas des individus « sains » (S16-S17-S18) et « nécrosés » (N1-N2-N3) à Bongo, placette d'étude - transpiration moyenne journalière ( $Tr$ , en cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O s<sup>-1</sup>) et conductance hydraulique du xylème (des troncs et des racines) ( $1/r_{racines-tronc}$ ; cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O s<sup>-1</sup> bars<sup>-1</sup>) lors de la période du 11 au 22 mai et du 5 au 18 septembre 2004. *Rubber tree plantation in Bongo, study plot – mean daily transpiration ( $Tr$ , cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O s<sup>-1</sup>) and xylem conductance (stem and roots) ( $1/r_{roots-stem}$ ; cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O s<sup>-1</sup> bars<sup>-1</sup>) of the « healthy » (S16-S17-S18) and of «*

Les valeurs maximales de transpiration sont obtenues vers 14h. La transpiration moyenne maximale pour les individus « sains » est respectivement de  $Tr= 12,5; 12,0$  et  $11,5 \text{ dm}^3 \text{ H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{ heure}^{-1}$ , soit une moyenne de  $Tr= 12,1 \text{ dm}^3 \text{ H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{ heure}^{-1}$ . L'écart relatif entre individus est de 16 % avec une erreur standard de 0,6 pour un pas de temps d'une heure. La transpiration moyenne maximale pour les individus « nécrosés », est respectivement de  $Tr= 10,3; 9,0$  et  $11,8 \text{ dm}^3 \text{ H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{ heure}^{-1}$ , soit une moyenne de  $Tr= 10,4 \text{ dm}^3 \text{ H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{ heure}^{-1}$ . L'écart relatif entre individus est de 10,7 % avec une erreur standard de 0.6 pour un pas de temps d'une heure. La différence maximale à 14h entre individus « sains » et individus « nécrosés » est de  $Tr= 1,7 \text{ dm}^3 \text{ H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{ heure}^{-1}$ . La transpiration des individus « nécrosés » est plus faible que celle des individus « sains » à tous les pas de temps de prise de mesure (20 minutes, 1 heure, 1 jour) permettant de conclure qu'une contrainte hydrique est imposée à ces individus « nécrosés ». Nous avons représenté dans le tableau 4, les moyennes sur dix-huit jours des transpirations instantanées:  $1,9 (\pm 0,11; \text{individus « sains »})$  et  $1,4 (\pm 0,31; \text{individus « nécrosés »}) \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , soit une transpiration des individus « nécrosés » inférieure de 30 % à celle des individus « sains » ( $Tr= 0,5 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) (tableau 4). La transpiration moyenne journalière a été respectivement pour les individus « sains » et les individus « nécrosés » de  $2,7 \text{ mm jour}^{-1}$  et  $2,3 \text{ mm jour}^{-1}$  ( $Tr= 17,5$  et  $13,5 \text{ dm}^3 \text{ arbre}^{-1} \text{ jour}^{-1}$ ).

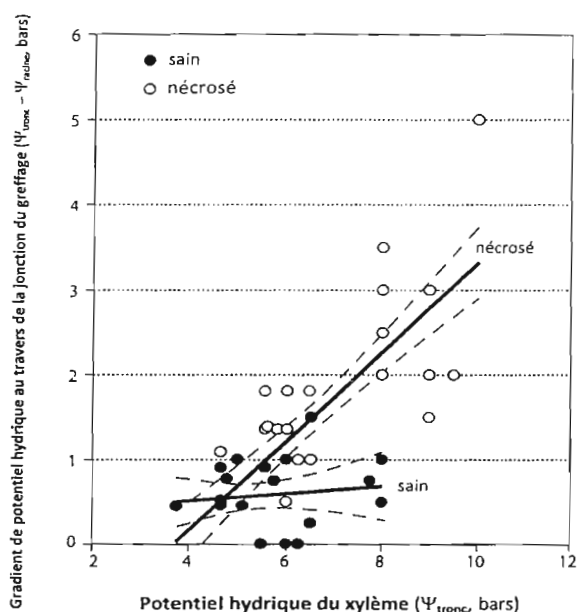
*Potentiels et résistances au flux de sève des individus « sains » et des individus « nécrosés »:* on a choisi, les 12 mai et 19 septembre, des individus « sains » et des individus « nécrosés », proches les uns des autres, pour le suivi des cinétiques journalières de la résistance stomatique, du potentiel foliaire, du potentiel du xylème - tronc, du potentiel du xylème - racines et des potentiels de base correspondants, les résultats figurent dans les tableaux 3a et 3b.

Le potentiel hydrique de base rend compte de l'équilibre potentiel hydrique du sol – potentiel hydrique du compartiment mesuré (feuilles, tronc, racines) qui s'établit pendant la nuit, période sans transpiration; ce potentiel tend, sans nécessairement l'atteindre, vers le potentiel hydrique du sol, ici à la capacité au champ pendant les deux périodes de mesures. Les moyennes du potentiel foliaire de base, sont respectivement pour les individus « sains » et « nécrosés »  $\Psi_{\text{feuilles}}= -3,2$  et  $-3,6$  bars en mai, et  $\Psi_{\text{feuilles}}= -3,8$  et  $-3,4$  bars en septembre. La précision de l'appareil étant de  $\pm 0,5$  bars, il n'existe pas de différence entre individus « sains » et individus « nécrosés ». Comme pour les feuilles, les moyennes du potentiel de base du xylème ne différencient pas les individus « sains » des individus « nécrosés », ces valeurs étant par ailleurs les mêmes pour le tronc et pour les racines et ce, en mai et en septembre:  $-4,1 / -4,1$  bars.

Les moyennes journalières du potentiel foliaire (tableaux 3a et 3b), sont respectivement, pour les individus « sains » et individus « nécrosés »,  $\Psi_{\text{feuilles}}= -6,0 (\pm 0,9)$  et  $-8,6 (\pm 1,4)$  bars en mai, et  $\Psi_{\text{feuilles}}= -6,1 (\pm 1,0)$  et  $-7,4 (\pm 1,3)$  bars en septembre. Le potentiel foliaire des individus « nécrosés » est inférieur à celui des individus « sains » d'environ 2,0 bars. On comparera ces valeurs à celles mesurées, respectivement pour les individus « sains » et les individus « nécrosés », en Côte d'Ivoire (le 26 mars 2003):  $\Psi_{\text{feuilles}}= -3,5$  et  $-4,8$  bars; au Nigeria (le 1<sup>er</sup> avril 2003) site n°1:  $\Psi_{\text{feuilles}}= -4,7$  et  $-5,4$  bars; site n°2:  $\Psi_{\text{feuilles}}= -8,8$  et  $-11,7$  bars; au Cameroun (le 7 avril 2003) site n°1:  $\Psi_{\text{feuilles}}= -4,5$  et  $-5,3$  bars; site n°2:  $\Psi_{\text{feuilles}}= -9,1$  et  $-10,4$  bars (Nandris et al., 2004).

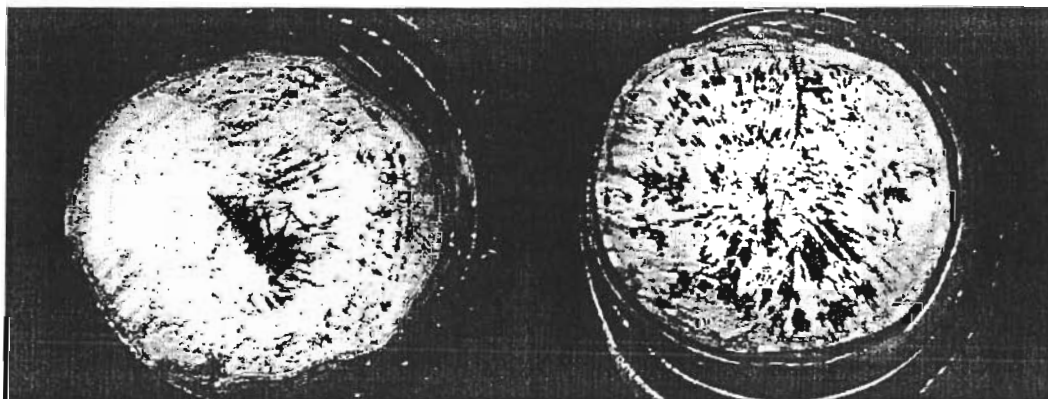
Les moyennes journalières du potentiel du xylème (tableaux 3a et 3b) sont respectivement, pour les individus « sains » et les individus « nécrosés »; 1<sup>e</sup>) pour les racines  $\Psi_{\text{racines}}= -3,9$

bars et -4,2 bars en mai et  $\Psi_{racines} = -4,9 (\pm 0,1)$  et  $-5,2 (\pm 1,1)$  bars en septembre; 2<sup>e</sup>) pour les troncs  $\Psi_{tronc} = -4,6 (\pm 0,9)$  et  $-5,6 (\pm 1,3)$  bars en mai et  $\Psi_{tronc} = -5,6 (\pm 1,1)$  et  $-7,2 (\pm 1,0)$  bars en septembre. Le potentiel du xylème des individus « nécrosés » est inférieur à celui des individus « sains » d'environ 0,5 bars pour les racines et d'environ 1,5 bar pour les troncs.



**Figure 1** - Relation entre le gradient de potentiel hydrique au travers la jonction et le potentiel hydrique du tronc ( $\Psi_{racines} - \Psi_{tronc}$ ) et potentiel hydrique moyen du xylème ( $\Psi_{tronc}$ ) des individus « sains » et « nécrosés ». *Relationship between gradient of the xylem water potential across graft zone ( $\Psi_{root} - \Psi_{stem}$ ) and the stem water potential ( $\Psi_{stem}$ ) of the « healthy » and « necrotic » trees*

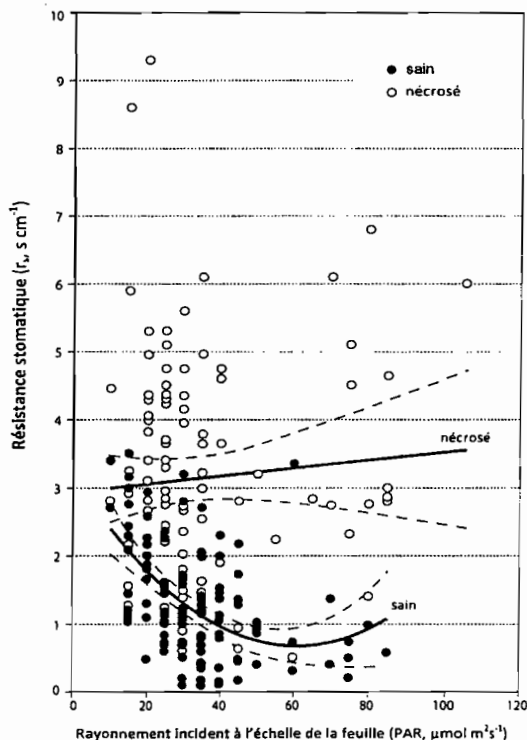
Les mesures ont été faites en saison humide, dans des conditions de disponibilité en eau optimales, ainsi, les résistances stomatiques mesurées sont les résistances stomatiques minimales et sont, respectivement pour les individus « sains » et les individus « nécrosés »  $r_{stomatique} = 1,2$  et  $1,8 \text{ s cm}^{-1}$  en mai et  $1,59 (\pm 0,5)$  et  $2,8 (\pm 0,5) \text{ s cm}^{-1}$  en septembre (figure 1). Les résistances stomatiques minimales des individus « nécrosés » sont supérieures à celles des individus « sains » d'environ  $1,0 \text{ s cm}^{-1}$ , et sont associées à des potentiels foliaires et à des potentiels du xylème plus négatifs que chez individus « sains », et à une transpiration inférieure à celle des individus « sains » suggérant l'induction d'un stress hydrique pour les individus « nécrosés » (figure 2).



**Photo 8** - Surface supérieure d'un billot prélevé au niveau de la jonction de greffage sur le tronc mis dans un bain de Phoxine B®: (a) d'un individu « nécrosé » et (b) d'un individu « sain ». *Upper surface of a block of*

wood taken on the stem at the level of the grafting junction put in a bath of Phoxine B®: (a) of a « healthy » tree and (b) of a « necrotic » tree

**Résistances au flux de sève:** nous commencerons par rappeler les résultats des mesures faites au Ghana (Nizinski *et al.*, 2005) avec de la Phoxine B®: les premières taches apparaissent au bout de 20 secondes environ sur les individus « sains » et au bout d'une minute environ sur les individus « nécrosés », par ailleurs, la surface « tachée » des individus « sains » (photo 8b) est supérieure à celle des individus « nécrosés » (photo 8a). Le transfert de Phoxine B®, donc de sève brute, est qualitativement plus important et plus rapide chez les individus « sains » que chez les « nécrosés ». Nous avons utilisé l'analogie de la loi d'Ohm (Landsberg et Gower, 1997) dans l'analyse du flux de sève brute: supposant une continuité de flux entre racines et cavités sous-stomatiques, la transpiration d'une feuille est proportionnelle à la différence de potentiel entre le sol et la feuille, et inversement proportionnelle aux résistances existant sur le parcours sol – racines - tronc - cavités sous-stomatiques ( $\lambda E = \Delta\Psi/R$ ). Les mesures de potentiels hydriques nous permettent d'apprécier les résistances le long du continuum racines – tronc – feuilles (tableau 4): les résistances (R) ou conductance ( $k_h$ ) ( $=1/\text{Résistance}$ ) au passage de l'eau entre le tronc et les feuilles sont les mêmes pour les individus « sains » ( $k_h = 0,3 \pm 0,1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$ ) et les individus « nécrosés » ( $k_h = 0,2 \pm 0,1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$ ); les conductances au passage de l'eau entre les racines et le tronc différencient en revanche radicalement les deux types d'individus:  $k_h = 0,2 \pm 0,1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$  pour les individus « sains » et  $k_h = 1,1 \pm 0,3 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$  pour les individus « nécrosés », phénomène que l'on retrouve à partir de l'analyse de la conductance des racines aux feuilles (tableau 4). C'est donc au niveau de la jonction de greffage que la conductance est exceptionnellement basse pour les individus « nécrosés », sachant par ailleurs que chez les ligneux, les conductances du xylème ne sont pas les plus limitantes pour la circulation de l'eau (résistances plus faibles qu'au niveau des feuilles). Ainsi cette résistance élevée au flux de sève au niveau de la jonction de greffage chez les individus « nécrosés » induit un stress hydrique chez ces individus: potentiel hydrique du xylème – tronc et potentiel hydrique foliaire plus négatifs que chez les individus « sains », transpiration plus faible que chez les individus «sains» (figure 2).



**Figure 2** - Relation entre la résistance stomatique ( $r_s$ ,  $s\ cm^{-1}$ ) et le rayonnement incident (PAR,  $\mu mol\ m^2\ s^{-1}$ ) à l'échelle de la feuille. *Relationship between leaf stomatal resistance ( $r_s$ ,  $s\ cm^{-1}$ ) and Photosynthetically Active Radiation (PAR,  $\mu mol\ m^2\ s^{-1}$ ) at leaves level*

Les potentiels de base, des feuilles, du xylème du tronc et du xylème des racines, similaires pour les individus « sains » et les individus « nécrosés », s'expliquent par le choix de la saison de mesure: dans des conditions de disponibilité en eau optimales le rééquilibrage des potentiels sol – plante est ici optimal puisque, malgré une résistance élevée au passage de l'eau à travers la jonction de greffage chez les individus « nécrosés », la durée de la nuit est suffisante pour que le rééquilibrage des potentiels se fasse de la même façon pour les individus « sains » et les individus « nécrosés ».

## Conclusion et perspectives

Ces premiers résultats démontrent une différence de fonctionnement entre individus « sains » et individus « nécrosés » dans la régulation du flux transpiratoire. Les mesures ont été faites ici en conditions de disponibilité en eau optimales, il faudrait poursuivre ces mesures en conditions de stress hydrique pour la plante, en saison sèche en conditions naturelles et en conditions semi contrôlées en culture:

1<sup>er</sup>) concernant les cinétiques des résistances foliaires, de la transpiration, des potentiels au cours d'une journée, on devrait par exemple obtenir au midi solaire des résistances stomatiques pour les individus « nécrosés » de très loin supérieures à celles des individus « sains » et des transpirations quasi nulles pour ces individus « nécrosés »;

2<sup>ème</sup>) concernant les potentiels de base, le rééquilibrage entre le sol et la plante au cours d'une période longue de manque de disponibilité en eau, pourrait ne plus être complet chez les individus « nécrosés », on devrait voir les potentiels hydriques de base des individus « nécrosés » se différencier de ceux des individus « sains » et obtenir en fin de nuit des individus « nécrosés » présentant déjà un stress hydrique important, le rééquilibrage des potentiels étant un phénomène nécessitant une durée minimale compte tenu de la vitesse des phénomènes physiologiques en jeu;

3<sup>ème</sup>) la conductivité hydraulique au niveau de la jonction de greffage, les potentiels et la transpiration pourraient être étudiée avec un pas de temps de mesure inférieur à une heure.

Le stress hydrique subit par les individus « nécrosés » 1<sup>er</sup>) s'exprime au niveau du tronc et des feuilles (potentiels, résistances, transpiration), le problème serait alors d'origine mécanique (qualité du greffage – vascularisation anormale), mais 2<sup>e</sup>) s'exprime aussi au niveau des racines (potentiel du xylème - racines des individus « nécrosés » plus négatif que celui des individus « sains »), le problème serait alors celui d'une pathologie avec agent extérieur se mettant en place au moment du greffage.

Cette étude pourrait se poursuivre par une étude du métabolisme du carbone: les individus « nécrosés » ayant, en conditions naturelles une résistance stomatique globalement supérieure à celle des individus « sains », devraient présenter, à capacité photosynthétique supposée égale à celle des individus « sains », une entrée nette de carbone inférieure à celle des individus « sains ». On peut penser que le compartiment en priorité affecté par ce manque de carbone est le latex.

Enfin, une origine génétique possible des différences existant entre individus « sains » et individus « nécrosés » devrait être étudiée.

**Remerciements :** Ce programme a été financé par Institut Français du Caoutchouc (MICHELIN-SIPH-SOCFINCO). Nous remercions la Direction Générale de la SAPH et le personnel de la plantation de Bongo (Côte d'Ivoire) et nos collègues André Clément-Demange (CIRAD-CP Hévéa), Daniel Nandris, Frédéric Pellegrin et Hervé Crétin (Institut de Recherche en Développement, Montpellier) de leur aide sur le terrain.

## **Bibliographie**

CRUIZIAT P. et TYREE M., 1990 : La montée de la sève dans les arbres. *La Recherche*, **21**, 406-414.

DIXON M., 2004 : *Temperature corrected stem hygrometer*. Instruction Manual, Plant Water Status Instruments, Inc., Guelph, 14 p.

KRAMER P.J. et KOZLOWSKI T.T., 1979 : *Physiology of woody plants*, Academic Press, London, 811 pages.

LANDSBERG J.J. et GOWER S.T., 1997 : *Applications of physiological ecology to forest management*. Academic Press, London, 354 p.

MONTEITH J.L., 1965 : *Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms*. Symposia of the Soc. Exp. Biol., New York, Academic Press, **19**, 205-234.

MONTEITH J.L. et UNSWORTH M.H., 1990 : *Principles of environmental physics*. 2<sup>nd</sup> édition, Edward Arnold, London, 291 p.

MONTENY B.A., 1987 : *Contribution à l'étude des interactions végétation - atmosphère en milieu tropical humide. Importance du rôle du système forestier dans le recyclage des eaux de pluies*. Thèse d'Etat, Université de Paris - Sud, Orsay, 170 p.

NANDRIS D., CHRESTIN H., PELLEGRIN F. et MOREAU R., 2004 : *Rapport de synthèse de 1999 à 2004 sur la Nécrose de l'écorce de l'hévéa*. Convention de recherche « NEH » entre l'IRD & IFC-Michelin-SIPH-SOCFINCO, Montpellier, 150 p.

NIZINSKI J.J., DINGKUHN M., CLEMENT-DEMANGE A., FABRE D., CLEMENT-VIDAL A. et SAINTE-BEUVE J., 2005 : *Analyse écophysiological de l'eau chez Hevea brasiliensis d'individus sains et d'individus atteints de nécrose corticale dans des plantations en Côte d'Ivoire*, Rapport d'expertise n°CP-SIC1812, CIRAD, Montpellier, 30 p.

NIZINSKI J.J., GALAT-LUONG A. et GALAT G., 2009 : Aspects bioclimatiques de nécrose corticale de l'hévéa. *Geographia Technica*, numéro spécial, 355-360

NIZINSKI J.J., GALAT-LUONG A., GALAT G. et LHOMME J.P., 2010 : L'intérêt de l'utilisation *in situ* des sondes psychrométriques de Dixon-Tyree: cas d'une plantation d'hévéa en Côte d'Ivoire. *Climatologie*, **7**, 109-121

PENMAN H.L., 1948 : Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society*, London, Series A **193**, 120-145.

PHILIP J.R., 1966 : Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology*, **28**, 71-88.

RITCHIE G.A. and HINCKLEY T.M., 1975 : The pressure chamber as an instrument for ecological research. *Advances in Ecological Research*, **9**, 165-254.

THOM A.S., 1972 : Momentum, mass and heat exchange of vegetation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **98**, 124-134.

## 10. ÉVAPOTRANSPIRATION REELLE ET RESISTANCE DU COUVERT D'UNE SAVANE A *LOUDETIA ARUNDINACEA* (BASSIN DU KOUILOU, CONGO-BRAZZAVILLE) (Nizinski et al. 2009<sup>19</sup>)

### Résumé :

L'objectif de ce travail est d'estimer l'évapotranspiration réelle et la résistance du couvert d'une savane en utilisant la méthode du rapport de Bowen pour deux périodes contrastées, saison sèche et saison des pluies. La fiabilité de cette méthode a été appréciée par comparaison avec l'équation Monteith et la méthode de l'équation du bilan hydrique. Cette savane est dominée à 90 % par *Loudetia arundinacea* (Pointe Noire, Congo). Les résultats présentés sont issus de mesures qui ont duré 24 jours, du 18 septembre au 11 octobre 1998 : (a) du 18 au 29 septembre (« saison sèche »), la rétention en eau du sol a été inférieure à 70 % de la réserve à la capacité au champ (de 63 à 70 % de  $R_{CC}$ ; stress hydrique sévère ;  $T/ETP$  de 0,2 à 0,4) ; (b) du 30 septembre au 11 octobre (« saison des pluies ») la rétention en eau du sol a été de 90 à 92 % de  $R_{CC}$ ; stress hydrique négligeable ;  $T/ETP$  de 0,73 à 0,77). La résistance du couvert moyenne journalière issue du rapport de Bowen a été de  $317 \text{ s m}^{-1}$ , avec  $355 \text{ s m}^{-1}$  pour la « saison sèche » et de  $279 \text{ s m}^{-1}$  pour la « saison des pluies ». Les valeurs de l'ETR cumulée de la savane issues du rapport de Bowen, méthode du bilan hydrique, équation de Penman-Monteith sont respectivement de 58,6 – 57,8 et 56,2 mm, avec une ETR moyenne journalière de 2,4-2,4 et 2,3  $\text{mm jour}^{-1}$ , l'ETR moyenne journalière étant de 2,4 - 1,5 et 2,2  $\text{mm jour}^{-1}$  en « saison sèche » et de 2,5 - 3,4 et 2,5  $\text{mm jour}^{-1}$  en « saison des pluies ». La méthode du rapport de Bowen permet de quantifier l'évapotranspiration réelle de la savane à partir des mesures des gradients de température et d'humidité de l'air, du rayonnement net et du flux de chaleur dans le sol. Ses avantages en sont une rapidité de mise en place du dispositif de mesure, une résolution temporelle des mesures inférieure à une heure, une continuité des mesures, une bonne intégration des hétérogénéités du flux de chaleur latente d'évaporation du couvert. Ce dispositif est adapté aux recherches agro-météorologiques et éco-physiologiques faites en milieu tropical avec des équipes restreintes.

**Mots-clés:** résistance du couvert, rapport de Bowen, équation Monteith, évapotranspiration, bilan hydrique

### Abstract:

#### Measurement of savannah's actual evapotranspiration and surface resistance in the Kouilou basin, Congo-Brazzaville

The aim of this work is to study the actual evapotranspiration and surface resistance of the savannah using the Bowen-ratio method for two contrasted periods, dry and rainy season. The reliability of this method has been assessed by comparison with the Monteith equation and the soil-water balance method in a 90 % *Loudetia arundinacea* dominated savannah (Pointe Noire, Congo). Our results relate to the period from 18 September to 11 October 1998 (24 days): (a) from 18 to 29 September (« dry season »), the soil-water content was inferior than 70 % of the soil-water content at field capacity (63-70 % of  $R_{FC}$ ; large soil-water stress;  $T/E_p$  from 0.2 to 0.4); (b) from 30 September to 11 October (« rainy season ») soil-water content close to 90-92 % of  $R_{FC}$ ; no soil-water stress;  $T/E_p$  from 0.73 to 0.77). The mean daily surface resistance issued from the Bowen-ratio method was  $317 \text{ s m}^{-1}$ ,  $355 \text{ s m}^{-1}$  during the « dry season » and  $279 \text{ s m}^{-1}$  during the « rainy season ». The total actual evapotranspiration ( $E_a$ ) issued from the Bowen-ratio method, Penman-Monteith equation and soil-water balance method were, respectively of 58.6–57.8 and 56.2 mm, with the mean daily  $E_a$  of 2.4-2.4 and 2.3  $\text{mm day}^{-1}$  (2.4-1.5 and 2.2  $\text{mm day}^{-1}$  in « dry season » and of 2.5-3.4 and 2.5  $\text{mm day}^{-1}$  in « rainy season »). The Bowen-ratio method was used for the assessment of the actual evapotranspiration from the

<sup>19</sup> Nizinski J.J., Galat-Luong A., Galat G., Dingkuhn M. & Fabre D., 2009. Evapotranspiration réelle et résistance du couvert d'une savane à *Loudetia arundinacea* (bassin du Kouilou, Congo-Brazzaville). *Climatologie*, vol. 6, 33-45

temperature and specific humidity differences, net radiation and the soil heat flux measurement: its advantages are a rapidity of installation, a temporal resolution of measurement inferior to an hour and a good integration of the heterogeneity of the savannah's latent flux of vaporization. This method is adapted to the eco-physiological studies in the tropical conditions with reduced teams.

**Key-words:** surface resistance, Bowen-ratio, Monteith equation, evapotranspiration, soil-water balance

## 1. Introduction

Les études sur l'économie de l'eau dans le bassin du Kouilou, sur la façade atlantique du Congo, ont débuté en 1996 au Laboratoire d'Ecologie Végétale de Pointe Noire (Institut de Recherche pour le Développement) dans le cadre de la durabilité de plantations d'Eucalyptus (Nizinski et al., 2001), en collaboration avec les équipes de l'Unité de Recherche sur la Productivité des Plantations Industrielles du CIRAD et de l'INRA de Nancy (Bouillet et al., 1999). Ces recherches portaient sur le bilan hydrique de deux écosystèmes, la savane, l'écosystème naturel de cette région, et des plantations d'Eucalyptus (Nizinski et al. 2008), écosystème artificiel qui tend à remplacer la savane.

L'objectif de ce travail est d'estimer l'évapotranspiration réelle et la résistance du couvert de la savane en utilisant la méthode du rapport de Bowen (Bowen, 1926) à l'aide d'un dispositif mobile, pour deux périodes contrastées, saison des pluies et saison sèche. La méthode du rapport de Bowen permet de quantifier l'évapotranspiration réelle des couverts végétaux et leurs résistances à partir des mesures des gradients de température et d'humidité de l'air, du rayonnement net et du flux de chaleur dans le sol. La fiabilité de cette méthode a été appréciée par comparaison avec la méthode de l'équation Penman-Monteith (Monteith, 1965) et la méthode de l'équation du bilan hydrique.

Cette méthode a essentiellement été utilisée dans les zones climatiques tempérées; les travaux dans les zones tropicales sont récents et peu nombreux (Amarakoon et al., 2000). L'emploi d'un dispositif mobile permet de travailler sur de grandes surfaces, avec des équipes restreintes. Cette étude donne une première estimation des échanges d'énergie, de masse et de quantité de mouvement de cette savane qui pourront ensuite être comparés aux échanges caractéristiques des plantations.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Station d'étude

La zone d'étude, la région du Kouilou, est située entre le Cabinda au sud (Angola) et le Gabon au nord (surface de 13315 km<sup>2</sup>) ; cette région est soumise à un climat tropical humide de type équatorial de transition (climat bas-congolais, la façade maritime du Congo constitue la partie septentrionale de la zone plus sèche qui borde le sud-ouest du continent africain) avec des précipitations moyennes annuelles de  $P_{1949-98} = 1188 \text{ mm an}^{-1}$ , une évapotranspiration potentielle (Penman, 1948) de  $1390 \text{ mm an}^{-1}$  ( $ETP_{92-98} = 3,8 \text{ mm jour}^{-1}$ ,  $ETP_{SAISON PLUIES} = 4,2 \text{ mm jour}^{-1}$ ,  $ETP_{SAISON SECHE} = 3,2 \text{ mm jour}^{-1}$ ), une température moyenne de l'air de 24,9 °C, une humidité relative de l'air de 81,1 % (moyennes issues de mesures de 1949 à 1998, station de référence Pointe Noire). On reprend la classification de Vennetier (1968) qui décompose l'année en fonction de la pluviométrie : la saison des pluies s'étale sur environ 150 jours de novembre à avril, la saison sèche de juin à septembre ; les mois de mai et octobre sont considérés comme mois de transition.

Les mesures ont été faites du 18 septembre au 11 octobre 1998. Les précipitations incidentes annuelles et l'évapotranspiration potentielle annuelle, ont été respectivement pour 1998, de 1274 et 1390 mm an<sup>-1</sup> ; ces valeurs sont très proches des moyennes annuelles de Pi et de ETP. Les valeurs saisonnières, saison des pluies et saison sèche, de Pi et ETP ont été comparées aux valeurs moyennes calculées sur 49 ans pour Pi ( $Pi_{49-98} = 1034$  mm) et sur sept ans pour ETP ( $ETP_{92-98} = 1390$  mm an<sup>-1</sup>) : la saison des pluies 1998-1999 est excédentaire avec  $Pi_{98-99} = 1140$  mm, soit 110,2 % de  $Pi_{49-98}$ . L'ETP est proche de la moyenne 1992-1998, soit 1390 mm an<sup>-1</sup> pour 1998 (99,9 % de  $ETP_{92-98}$ ). La zone d'étude est située à 40 km de Pointe Noire à proximité du lieu-dit Kondi (latitude 4°34' S, longitude 11°54' E, altitude 125 m) dans un bassin sédimentaire côtier tertiaire (pliocène), de la série des cirques, avec grès argileux, sables et argiles. La station d'étude (Photo 1), d'une surface de 892 m<sup>2</sup> (29,7 x 30,0 m) est située sur les 38 ha (1500 x 2500 m) d'un peuplement qui est l'un des lambeaux de la savane d'origine. Le sol de la station d'étude est un sol ferrallitique fortement dessaturé à texture sablo argileuse ; la zone racinaire a une profondeur de 3 m, la capacité au champ est  $R_{CC} = 363$  mm, le point de flétrissement permanent  $R_{PFP} = 182$  mm et la réserve utile  $R_{RU} = 181$  mm.

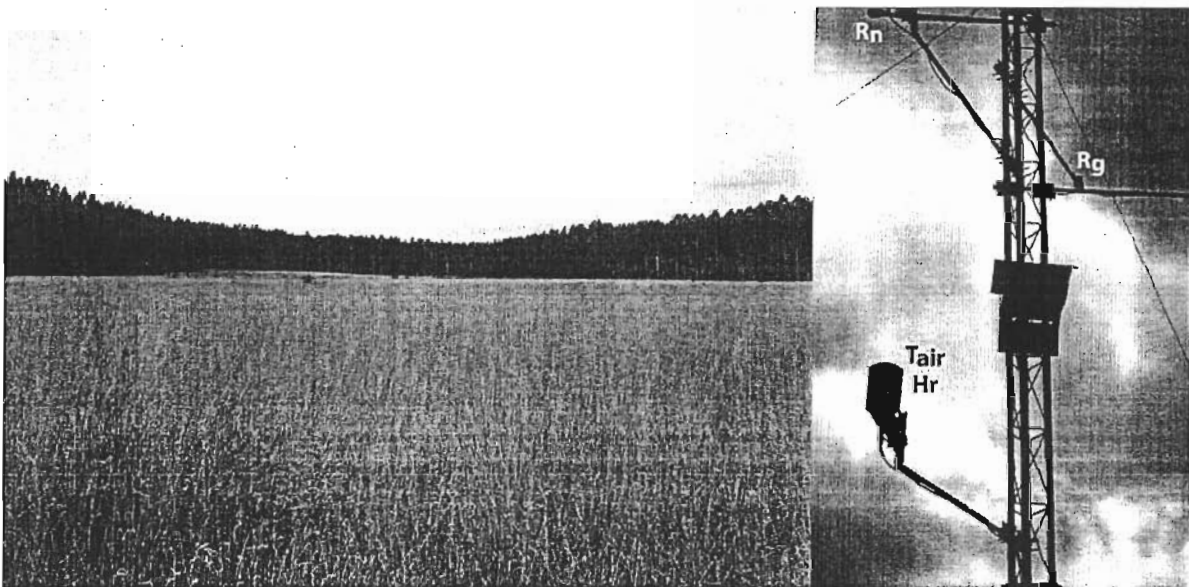


Photo 1 - Vue de la station d'étude - une savane à *Loudetia arundinacea*.

Cette savane est dominée à 90 % par *Loudetia arundinacea* (présence de *Bulbostylis laniceps*, *Cassia mimosoides*, *Ctenium newtonii*, *Cyperus amabilis*, *Cyperus tenax*, *Cyanotis lanata*, *Elionurus argenteus*, *Eriosema glomeratum*, *Eriosema erici-rosenii*, *Loudetia simplex*, *Rhynchelytrum nerviglume*, *Scleria boivinii*) avec, au pic de biomasse en février, une biomasse maximale de 3,5 t ha<sup>-1</sup> et une masse morte maximale de 4,6 t ha<sup>-1</sup> et avec au minimum de biomasse en septembre, une biomasse minimale de 0,9 t ha<sup>-1</sup> et une masse morte minimale de 1,9 t ha<sup>-1</sup> ; l'indice foliaire maximal est de 4,1 (février) et l'indice foliaire minimal de 1,3 (septembre) ; l'albédo de la savane, issu de mesures, est  $a = 0,23$  (moyenne pour les deux saisons).

## 2.2. Méthode d'estimation de l'évapotranspiration réelle à partir du rapport de Bowen

L'évapotranspiration réelle moyenne d'un couvert, estimée pour des périodes de 20 minutes, peut se calculer à partir des mesures du rayonnement net ( $R_n$ ), des mesures du flux de chaleur dans le sol ( $G_s$ ), et du rapport de Bowen (Bowen, 1926), grandeur calculée. Le rapport de

Bowen ( $\beta$ ) 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 ( $\lambda E$ ) :

$$\beta = H/\lambda E \quad [1]$$

Ce rapport de Bowen est utilisé avec l'équation du bilan d'énergie de la surface, ici simplifiée:

$$R_n = H + \lambda E + G_s \quad [2]$$

Avec :  $R_n$  - rayonnement net, en  $W m^{-2}$ ; H - flux de chaleur sensible, en  $W m^{-2}$ ;  $\lambda E$  - flux de chaleur latente d'évaporation, en  $W m^{-2}$ ;  $G_s$  - flux de chaleur dans le sol, en  $W m^{-2}$ , d'où :

$$\lambda E = (R_n - G_s)/(1 + \beta) \quad [3]$$

Pour les surfaces présentant une très petite pente (ici  $< 1,0 \%$ ), 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 nous appliquons le principe de « similarité » entre les coefficients de transfert de chaleur sensible ( $k_H$ ) et de chaleur latente ( $k_V$ ), ainsi  $k_H \approx k_V$  (Philip, 1987). Ici la hauteur du peuplement est de 1,5 m et sa surface de 38 ha. Avec des périodes de mesure de 20 minutes, les relations empiriques entre flux et gradients verticaux des chaleurs sensible et latente peuvent s'écrire :

$$H = -\rho_a c_p k_H (\partial T/\partial z) \text{ et } \lambda E = -((\rho_a c_p)/\gamma) k_V (\partial e/\partial z) \quad [4] \text{ et } [5]$$

Avec :  $\rho_a$  - densité de l'air, en  $kg m^{-3}$ ;  $c_p$  - chaleur massique de l'air, en  $J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ ;  $k_H$  - coefficient de transfert turbulent de chaleur sensible, en  $m^2 s^{-1}$ ; T - température de l'air, en  $^\circ C$ ; z - altitude, en m;  $(\partial T/\partial z)$  - gradient des températures, en  $^\circ C m^{-1}$ ;  $k_V$  - coefficient de transfert turbulent de masse, en  $m^2 s^{-1}$ ; e - pression actuelle de vapeur d'eau dans l'air, en kPa;  $(\partial e/\partial z)$  - gradient des pressions actuelles de vapeur d'eau dans l'air, en  $kPa m^{-1}$ ;  $\gamma$  - constante psychrométrique, en  $kPa ^\circ C^{-1}$ .

La constante psychrométrique s'écrit :

$$\gamma = (c_p p)/\lambda (M_{EAU}/M_{AIR}) \quad [6]$$

Avec :  $c_p$  - chaleur massique de l'air, en  $J kg^{-1}$  ( $1,012 J kg^{-1}$ ); p - pression atmosphérique, en kPa;  $\lambda$  - chaleur latente de vaporisation, en  $J g^{-1}$  ( $2451,8 J g^{-1}$ );  $M_{EAU}$  - masse molaire de l'eau, en  $kg mole^{-1}$  ( $18,10^{-3} kg mole^{-1}$ );  $M_{AIR}$  - masse molaire de l'air, en  $kg mole^{-1}$  ( $29,10^{-3} kg mole^{-1}$ ).

Le rapport de Bowen peut alors s'écrire :

$$\beta = \gamma (\partial T/\partial z)/(\partial e/\partial z) = \gamma (dT)/(de) \quad [7] \text{ et } [8]$$

ou encore s'écrire sous la forme :

$$\beta = \gamma (T_2 - T_1)/(e_{2(T_2)} - e_{1(T_1)}) \quad [9]$$

Avec :  $T_1$  - température de l'air à 2 m au-dessus de la surface du sol de la savane;  $T_2$  - température de l'air à 5 m au-dessus de la surface du sol de la savane;  $e_{1(T_1)}$  - pression actuelle de vapeur d'eau à la température de l'air  $T_1$  (z = 2 m au-dessus de la surface du sol de la savane);  $e_{2(T_2)}$  - pression actuelle de vapeur d'eau à la température de l'air  $T_2$  (z = 5 m au-dessus de la surface du sol de la savane).

Sachant que  $G_s$  peut s'écrire :

$$G_s = c_s h_{sol} [(\theta_s(t + dt) - (\theta_{s(t)}))/dt] \quad [10]$$

avec :  $c_s$  - capacité thermique du sol, en  $J m^{-3} ^\circ K^{-1}$  ( $1,96 \cdot 10^6 J m^{-3} K^{-1}$ ) ;  $dt$  - pas de temps des calculs, en s (1200 secondes) ;  $\theta_s(t + dt)$  - température moyenne du sol à 0,05 m de profondeur lors des 19<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> minutes du pas de temps de mesure,  $^\circ C$  ;  $\theta_{s(t)}$  - température moyenne à 0,05 m de profondeur lors des 1<sup>e</sup> et 2<sup>e</sup> minutes du pas de temps de mesure,  $^\circ C$  ;  $h_{sol}$  - épaisseur de la couche de sol prise en compte, ici 0,1 m ; capteurs à 0,05 m et à 0,15 m de profondeur.

Les valeurs de  $\lambda E$  calculées en  $J m^{-2} s^{-1}$  sur des périodes de 20 minutes (1200 s), sont sommées sur la journée pour obtenir l'évapotranspiration réelle journalière (en  $mm jour^{-1}$ ) :

$$ETR_{BOWEN} = \lambda E_j = \sum \lambda E_{(t)} dt \quad [11]$$

$$ETR_{PENMAN-MONTEITH} = ETP / (1 + ((\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_c r_a))) \quad (\text{Monteith, 1965}) \quad [12]$$

Avec :  $\lambda E_j$  - évapotranspiration réelle journalière, en  $mm jour^{-1}$  ;  $\lambda E_{(t)}$  - évapotranspiration réelle, pour  $dt = 1200$  s, en  $J m^{-2} s^{-1}$  ;  $r_c$  - résistance du couvert, en  $s m^{-1}$ .

### 2.3. Méthode d'estimation de la résistance du couvert

(a) à partir du rapport de Bowen (Paw et Meyers, 1989) :

$$r_c/r_a = [(((\Delta/\gamma) \beta) - 1) + (1 + \beta)] [\rho_a c_p ((e_{s(T)} - e_{a(T)})/\gamma (R_n - G_s))] \quad [13]$$

avec :  $r_c$  - résistance du couvert, en  $s m^{-1}$  ;  $r_a$  - résistance aérodynamique, en  $s m^{-1}$  ;  $r_a = (1/(k^2 u_2)) (\ln(z - d)/z_0)^2$  (Monteith, 1965) ;  $k$  - constante de von Karman (0,39) ;  $u_2$  - vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol, en  $m s^{-1}$  ;  $z$  - niveau considéré, en m ;  $z_0$  - hauteur de rugosité de la surface, en m ;  $d$  - hauteur du déplacement du plan où la vitesse du vent s'annule, en m ;  $d = 0,63 h$  et  $z_0 = 0,1 h$  (Thom, 1972) ; avec :  $d$  - hauteur de déplacement, en m ;  $z_0$  - longueur de rugosité, en m ;  $h$  - hauteur du peuplement, en m ;  $\Delta$  - dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en  $kPa ^\circ C^{-1}$  ;  $e_{s(T)} - e_{a(T)}$  - déficit de saturation de l'air, en  $kPa$  ;  $e_{s(T)}$  - pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface T, en  $kPa$ .

(b) issue du modèle de Jarvis-Stewart (Stewart, 1988) à partir des relations empiriques entre la résistance stomatique d'une feuille de *Loudetia arundinacea* ( $r_s$ ) (mesurée à l'aide d'un poromètre), l'indice foliaire (LAI), le rayonnement global ( $R_g$ ), le potentiel hydrique des feuilles ( $\Psi_{feuille}$ ; chambre à pression), le déficit de saturation de l'air ( $e_{s(T)} - e_{a(T)}$ ) et la réserve en eau du sol (R ; sonde à neutrons) (relations obtenues par Founa-Toutou, 2000) :

$$r_c = r_{smin}/LAI (f(R_g)) (g(\Psi_{feuille})) (h(e_{s(T)} - e_{a(T)})) (i(R_{CC} - R)) \quad [14]$$

Avec :  $r_{smin}$  - résistance stomatique minimale d'une feuille (valeurs mesurées), en  $s m^{-1}$ .

### 2.4. Dispositif expérimental et acquisition des données

Les mesures ont été faites à l'échelle du peuplement avec un pas de temps de vingt minutes. Les résultats présentés sont issus de mesures qui ont duré 24 jours: (a) du 18 au 29 septembre 1998 - période « saison sèche » (12 jours) avec une rétention en eau du sol inférieure à 70 % de la réserve à la capacité au champ (de 63 à 70 % de  $R_{CC}$  ; stress hydrique sévère ; rapport transpiration/évapotranspiration potentielle,  $T/ETP$ , de 0,24 à 0,37) ; et (b) du 30 septembre au 11 octobre 1998 - période « saison des pluies » (12 jours) avec une rétention en eau du sol de 89,9 à 92,0 % de  $R_{CC}$  (stress hydrique négligeable;  $T/ETP$  de 0,72 à 0,76). Les calculs de

l'ETR ont été faits à partir des valeurs diurnes des gradients des températures de l'air et du sol ( $dT$ ), des pressions actuelles de vapeur d'eau à la température de l'air  $T$  ( $d_e$ ) et du rayonnement net (durée astronomique du jour) de 6h00 à 18h00, soit une durée d'environ 12 heures, durée variant avec la date : pour le lieu-dit Kondi, le premier jour de mesure (le 261<sup>ème</sup> jour de l'année, le 18 septembre) la durée du jour est de 11,99 heures et le dernier jour de mesure (le 285<sup>ème</sup> jour de l'année, le 11 octobre) la durée du jour est de 12,09 heures.

Nous avons mesuré avec un pas de temps de vingt minutes la température moyenne de l'air, l'humidité relative de l'air (sonde HMP35AC, Vaisala®, Helsinki, Finlande), la vitesse du vent (anémomètre A100R, Vector Instruments®, Rhyl, Royaume Uni), et ce, à deux niveaux, à 2 m et à 5 m au-dessus de la surface du sol de la savane. Le rayonnement global (pyranomètre Li-200SZ, Li-cor®, NE, Etats Unis) et le rayonnement net (bilanmètre REBS/Q-7, Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis) ont été mesurés à 6 m au-dessus de la surface du sol. La température moyenne du sol a été mesurée à 0,05 m et 0,15 m dans le sol (sondes 107, Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis). Les sondes HMP35AC et les anémomètres ont été installés sur un mât de type « Super-Vidéo® » amovible et haubané (hauteur maximale de 36 mètres). Les capteurs ont été montés sur un mât de 6 m de hauteur.

Afin de minimiser l'influence des supports sur les mesures, les capteurs sont tenus par des bras métalliques longs de 1 à 2 m (selon la sensibilité du capteur concerné), ces derniers étant fixés et isolés des supports. Les mesures sont effectuées avec un pas de temps de vingt minutes et cumulées sur la journée pour donner les valeurs du rayonnement net, des températures de l'air, de l'humidité relative de l'air et de la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air ; ici exemple du 29 septembre 1998 ; Fig. 2a et 2b). La précision des mesures de température a été inférieure à  $\pm 0,01$  °C, soit pour les deux capteurs  $dT = \pm 0,02$  °C, la précision des mesures de la pression partielle de vapeur d'eau a été inférieure à  $\pm 0,01$  kPa, soit pour les deux capteurs  $d_e = \pm 0,02$  kPa (Revfeim et Jordan, 1976). Les mesures en continu ont été stockées sur une centrale d'acquisition de données de type Micrologger 21XL (Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis) et ensuite transférées à l'aide d'une interface optique RS232-SC32A et du logiciel PC208E Edlog Version 6.6. (Campbell Scientific®, Logan, Etats Unis) sur l'ordinateur installé dans le laboratoire mobile, un camion tout terrain aménagé en laboratoire (Fig. 1).

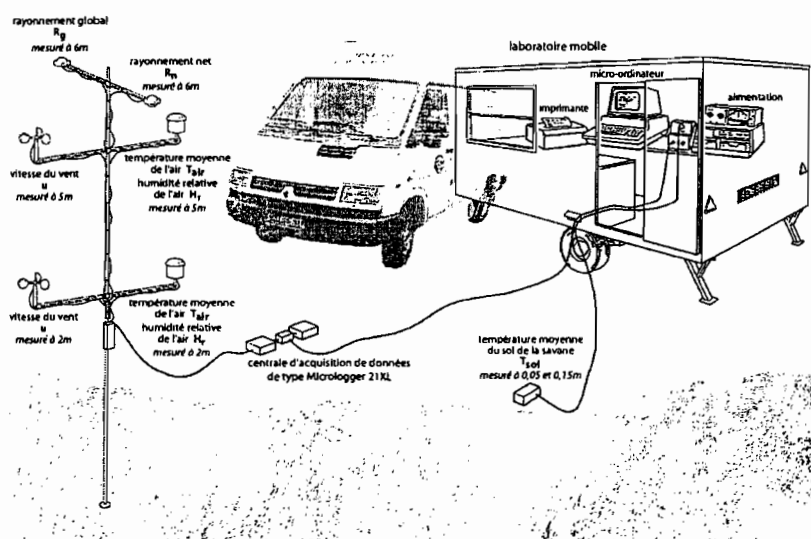


Figure 1 – Schéma du dispositif expérimental de mesure de l'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal

L'indice foliaire a été estimé chaque 30<sup>ème</sup> du mois à partir de mesures mensuelles de biomasse de janvier 1997 à juin 1999 avec estimation de la composition spécifique, de la biomasse et de la masse morte (échantillonnage : dix carrés de 1,0 x 1,0 m ; triés, séchés et pesés par espèce) et estimation de la masse surfacique d'un échantillon d'une cinquantaine de feuilles vivantes de *Loudetia arundinacea* (espèce dominante; prélèvements à l'aide d'un emporte pièce). La période de nos mesures correspond à la fin d'une saison sèche puis à une nouvelle période de croissance des espèces de la savane pendant laquelle la biomasse augmente. Nous avons établi une relation linéaire entre biomasse et indice foliaire à partir de laquelle ont été calculées les valeurs journalières de l'indice foliaire.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Profils des variables microclimatiques au-dessus de la savane (Fig. 2a et 2b)

Les résultats proviennent des mesures effectuées du 18 au 29 septembre « saison sèche » et du 30 septembre au 11 octobre 1998 (« saison des pluies »), elles ont été faites du sommet du couvert jusqu'au niveau  $z_1 = 2$  m et  $z_2 = 5$  m qui se situent dans la « couche limite de surface » au-dessus du couvert, couvert dense et homogène d'une hauteur de 1,5 m et d'une surface de 38000 m<sup>2</sup>. La « couche limite de surface » d'une telle savane subtropicale 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 ; il n'y a pas d'effet de « fetch » (Heilman et Brittin, 1989), c'est-à-dire que les formules aérodynamiques classiques peuvent y être utilisées pour déterminer les flux de chaleur sensible et les flux de chaleur latente d'évaporation. Nous avons exclu les valeurs du rapport de Bowen  $\beta \approx -1$ , valeurs comprises entre  $\beta = -1,3$  et  $\beta = -0,7$  (Ohmura, 1982) : il s'agit ici pour l'essentiel de mesures nocturnes pour lesquelles il y a inversion des gradients de température et de pression partielle de vapeur d'eau, pour  $R_n - G_s < 0$ ,  $dT < 0$  et  $dT < 0$ . Cette inversion des gradients de T et e s'est également produite au cours des journées du 18, 24 et 30 septembre et 7 octobre (précipitations incidentes respectivement de 7,9 mm, 3,8 mm, 91,7 mm et 8,7 mm).

Du 18 septembre au 11 octobre 1998 la moyenne de  $R_n$  et de  $G_s$  moyen journalier est respectivement de 7,4 et de 0,8 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (10,9 % de  $R_n$ ), avec pour la « saison sèche » 7,2 et 0,8 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (10,5 % de  $R_n$ ) et pour la « saison des pluies » 7,7 et 0,8 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (11,3 % de  $R_n$ ) (Tabl. 1). Les maximums journaliers de  $R_n$  ont été de 14,2 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (26 septembre 1998) (« saison sèche ») et de 12,3 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (« saison des pluies »). Les maximums journaliers de  $G_s$  ont été de 0,8 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (10 octobre 1998) (« saison sèche ») et 0,8 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (« saison des pluies »). Les minimums journaliers de  $R_n$  ont été respectivement de 3,1 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (20 septembre 1998) (« saison sèche ») et de 4,1 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (« saison des pluies »). Les minimums journaliers de  $G_s$  ont été respectivement de 0,8 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (27 septembre 1998) (« saison sèche ») et 0,8 M J m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup> (« saison des pluies »).

La mesure directe du flux de chaleur à la surface du sol est très imprécise ; cette imprécision est due aux différences de conductivité thermique entre les capteurs et le sol et à un écoulement d'eau et de vapeur d'eau sur les capteurs qui nuit à la qualité du contact entre ces capteurs et le sol. Le flux de chaleur dans le sol est en moyenne de 10,9 % de la valeur du rayonnement net. Le profil vertical diurne de la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air indique une diminution de la pression partielle avec l'altitude, la surface de la savane constitue donc la principale source d'évaporation de l'eau. Les pressions partielles de vapeur d'eau de l'air moyennes journalières  $e_2$  et  $e_5$  ont été respectivement de 24,3 et de 24,0 kPa, avec 24,1 et 23,7 kPa pour la « saison sèche » et 24,4 et 24,1 kPa pour la « saison des pluies ».

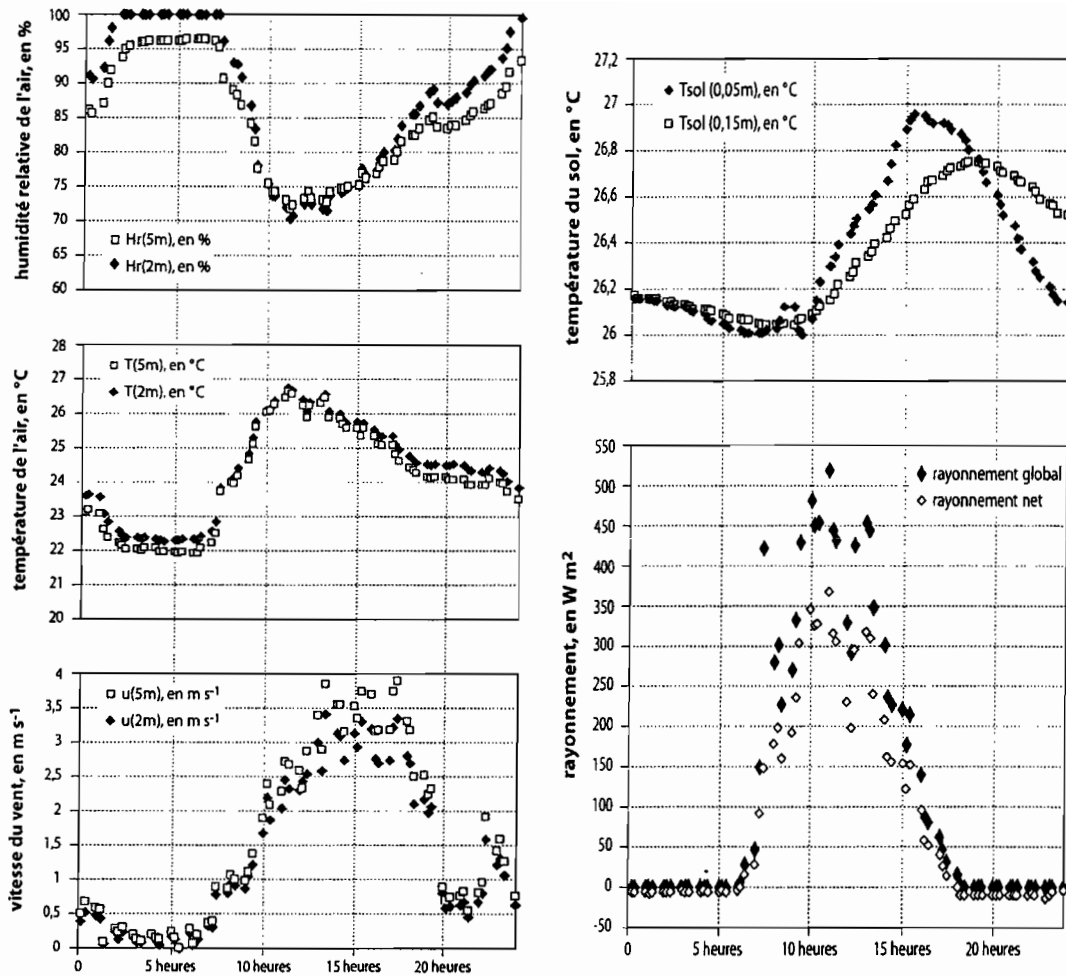


Figure 2 – Evolution au cours de la journée du 29 septembre 1998 (a) de la température moyenne de l'air ( $T_{air}$ ), de l'humidité relative de l'air ( $Hr$ ), de la vitesse du vent ( $u$ ) à 2,0 et 5,0 m au-dessus de la surface du sol de la savane ; (b) de la température du sol à 0,05 et 0,15 m de profondeur, du rayonnement global ( $R_g$ ) et rayonnement net ( $R_n$ ) à 6,0 m au dessus de la surface du sol de la savane

Les températures moyennes journalières de l'air  $T_2$  et  $T_5$  ont été respectivement de 24,3 et de 24,0 °C, avec 24,1 et 23,7 °C pour la « saison sèche » et 24,4 et 24,1 °C pour la « saison des pluies ». Les températures moyennes journalières du sol  $T_{0,05}$  et  $T_{0,15}$  ont été respectivement de 28,90 et de 28,12 °C, avec 28,24 et 28,56 °C pour la « saison sèche » et 29,51 et 28,56 °C pour la « saison des pluies ». Les vitesses du vent moyennes journalières ont été respectivement à 2 m et 5 m de hauteur au-dessus de la savane ( $u_2$  et  $u_5$ ) de 1,6 et 1,8 m s<sup>-1</sup>, avec 1,4 et 1,7 m s<sup>-1</sup> pour la « saison sèche » et 1,7 et 1,9 m s<sup>-1</sup> pour la « saison des pluies ».

Les valeurs du rayonnement net, de la pression partielle de vapeur d'eau de l'air, des températures de l'air moyennes journalières et de la vitesse du vent ont été comparées à celles issues des données météorologiques journalières de la station météorologique de l'Aéroport de Pointe Noire ( $R_n$  pour la station météorologique a été calculé selon la formule de Brunt, 1939) ;  $T_{météo}$ ,  $e_{météo}$ ,  $T$ ,  $e$  et  $u$  sont mesurés à 2 m du sol :  $R_n/R_{nmétéo}=0,93$  ;  $T/T_{météo} = 0,99$  ;  $e/e_{météo} = 0,98$  ;  $u/u_{météo} = 0,83$ . Si on détaille les deux « saisons », les valeurs de  $R_n$ , de  $T$ , de  $e$ , de  $u$ , sont : lors de la « saison sèche » :  $R_n/R_{nmétéo} = 0,89$  ;  $T/T_{météo} = 0,99$  ;  $e/e_{météo} = 0,97$  ;  $u/u_{météo} = 0,86$  ; et lors de la « saison des pluies » :  $R_n/R_{nmétéo} = 0,97$  ;  $T/T_{météo} = 0,99$  ;  $e/e_{météo} = 0,98$  ;  $u/u_{météo} = 0,80$ . Les rapports  $T/T_{météo}$ ,  $e/e_{météo}$  et  $u/u_{météo}$  indiquent que bien que ces deux points de mesures soient éloignés l'un de l'autre de 40 km, leur position par rapport à la

côte d'Atlantique (< 5 km) est déterminante, l'état de la surface (savane ou gazon de la station météorologique) l'étant moins.

Le rapport  $R_n/R_{n\text{météo}}$  s'explique par l'état de la surface (teneur en eau du sol, indice foliaire, recouvrement de la surface du sol) : le rayonnement net de la savane est changeant, celui du gazon de la station météorologique plus constant : lors de la « saison sèche » dans la savane, il subsiste des chaumes jaunies, l'indice foliaire est réduit (LAI = 1,6 - 1,9) et lors de la « saison des pluies » les feuilles sont de plus en plus vertes, l'indice foliaire varie de 1,9 à 2,2 ; le LAI du gazon bien alimenté en eau et ses qualités optiques sont supposés constants. Les valeurs du flux de chaleur latente d'évaporation ( $\lambda E$ ) et du rayonnement net ( $R_n$ ), ont été comparées à celles obtenues en 1968-1971 par Riou (1975, Brazzaville) : elles sont proches.

### 3.2. Evapotranspiration potentielle et réelle de la savane

L'évapotranspiration potentielle moyenne journalière sur 24 jours, issue de l'équation de Penman (1948) est de 3,6 mm jour<sup>-1</sup> ; l'évapotranspiration potentielle moyenne journalière étant de 3,6 mm jour<sup>-1</sup> en « saison sèche » et de 3,7 mm jour<sup>-1</sup> en « saison des pluies » (Tabl. 1). Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle moyenne journalière ont été comparées à celles calculées suivant la même formule de Penman (1948) à partir des données météorologiques journalières de la station météorologique de l'Aéroport de Pointe Noire : elles sont proches.

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle moyenne journalière ont été respectivement pour la savane (ETP) et la station météorologique (ETP<sub>météo</sub>) de 3,6 et 3,9 mm jour<sup>-1</sup> (ETP/ETP<sub>météo</sub> = 0,9) ; si on détaille les deux « saisons », les valeurs d'ETP sont : lors de la « saison sèche » 3,6 et 3,8 mm jour<sup>-1</sup> (ETP/ETP<sub>météo</sub> = 0,9) et lors de la « saison des pluies » 3,7 et 4,0 mm jour<sup>-1</sup> (ETP/ETP<sub>météo</sub> = 0,9). Le rapport ETP/ETP<sub>météo</sub> dépend de la hauteur du peuplement (la hauteur de la savane est de 1,5 m et celle du gazon de 0,1 m) et de l'indice foliaire, celui du gazon est supposé être constant, celui de la savane varie de LAI = 1,6 - 1,9 (« saison sèche ») à LAI = 1,9 - 2,2 (« saison des pluies »).

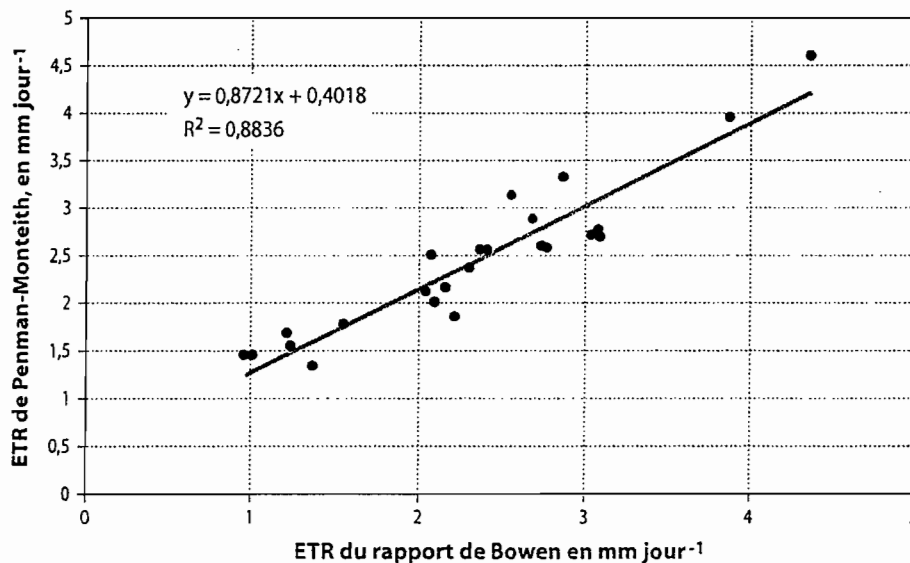
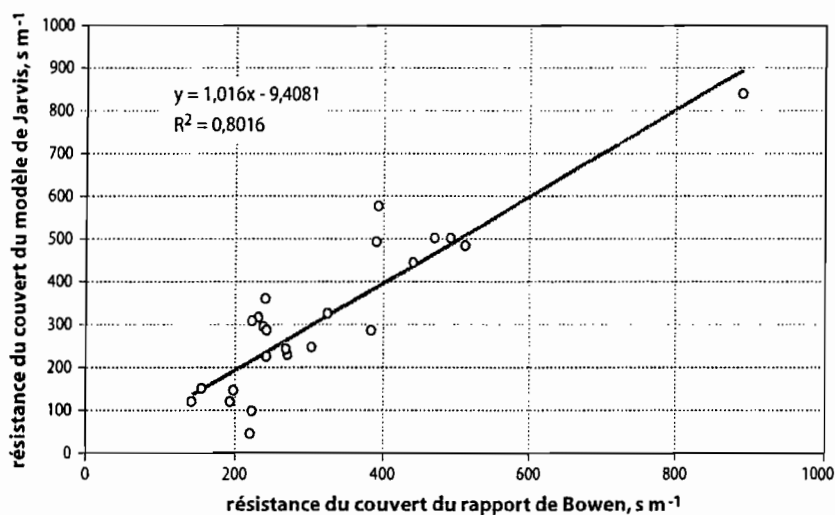


Figure 3 – Relation entre l'évapotranspiration réelle de la savane à *Loudetia arundinacea* issue de l'équation de Penman-Monteith et du rapport de Bowen ; valeurs journalières lors de la période du 18 septembre au 11 octobre 1998

Sur l'ensemble de la période de mesure, 24 jours, du 18 septembre au 11 octobre 1998 l'évapotranspiration réelle moyenne sur 20 minutes et sur la journée a été respectivement de  $0,03 \text{ mm } 20 \text{ min}^{-1}$  et de  $2,4 \text{ mm jour}^{-1}$ , avec pour la « saison sèche »  $0,03 \text{ mm } 20 \text{ min}^{-1}$  et  $2,4 \text{ mm jour}^{-1}$  et pour la « saison des pluies »  $0,03 \text{ mm } 20 \text{ min}^{-1}$  et  $2,4 \text{ mm jour}^{-1}$ . Les maximums journaliers de l'ETR ont été de  $0,55 \text{ mm } 20 \text{ min}^{-1}$  et de  $4,6 \text{ mm j}^{-1}$  (26 septembre 1998) (« saison sèche ») et de  $0,27 \text{ mm } 20 \text{ min}^{-1}$  et de  $3,9 \text{ mm jour}^{-1}$  (« saison des pluies ») ; les minimums journaliers de l'ETR ont été de  $1,4 \text{ mm jour}^{-1}$  (« saison sèche ») et de  $1,3 \text{ mm jour}^{-1}$  (« saison des pluies »). Nous avons comparé les valeurs de l'évapotranspiration réelle cumulée de la savane sur 24 jours issues du rapport de Bowen avec celles issues de l'équation du bilan hydrique (Nizinski et al., 2008) et de l'équation de Penman-Monteith (résistance du couvert issue du modèle de Jarvis-Stewart ; Founa-Toutou, 2000) (Fig. 4) obtenues sur la même station d'étude de façon synchrone) : les ETR cumulées sur vingt-quatre jours sont respectivement, pour l'équation du bilan hydrique, l'équation de Penman-Monteith et le rapport de Bowen, de 57,8 – 56,2 et 58,6 mm (Fig. 5), avec une évapotranspiration moyenne journalière de 2,41 - 2,34 et 2,44 mm jour<sup>-1</sup> (Tabl. 1).



**Figure 4** – Relation entre la résistance du couvert de la savane à *Loudetia arundinacea* issue du modèle de Jarvis-Stewart (Founa-Toutou, 2000) et du rapport de Bowen ; valeurs journalières lors de la période du 18 septembre au 11 octobre 1998

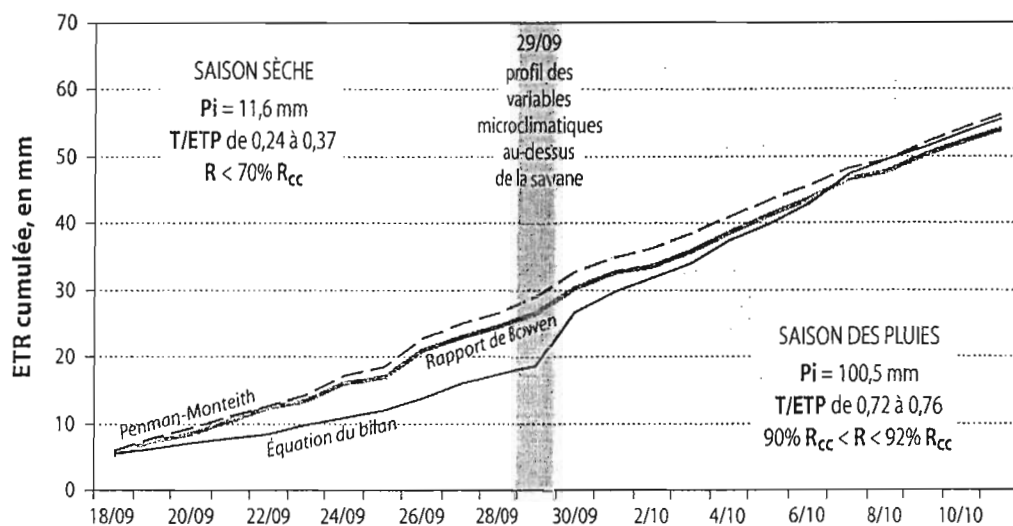
L'équation du bilan utilise un pas de temps hebdomadaire et c'est donc par calcul que l'on obtient des valeurs journalières. L'équation de Penman-Monteith et le rapport de Bowen utilisent un pas de temps journalier, c'est donc ces deux méthodes que nous comparerons (Fig. 3) : l'ETR issue respectivement de l'équation de Penman-Monteith et du rapport de Bowen est de 2,17 et 2,39 mm jour<sup>-1</sup> en « saison sèche » puis 2,51 et 2,50 mm jour<sup>-1</sup> en « saison des pluies ». La différence d'environ 10 % (de 0,22 mm jour<sup>-1</sup> ; Tabl. 1) lors de la « saison sèche » s'explique par l'hétérogénéité de la contribution des feuilles au sein du couvert au flux transpiratoire. L'approche de Penman-Monteith, méthode « simple », où l'indice foliaire (LAI) est une constante, est insuffisant : l'indice foliaire contribuant à la cinétique du flux transpiratoire est une fonction complexe dépendante de nombreux facteurs (position des feuilles, conditions de croissance, caractéristiques métaboliques...).

Le rapport de Bowen ne fait pas intervenir le LAI et cette méthode se rapproche au mieux du phénomène réel puisque l'on mesure la sortie réelle de vapeur d'eau. Lors de la « saison des pluies » les deux méthodes donnent des résultats similaires : le couvert végétal est assimilé à

une « grande feuille », surface végétale humide pour laquelle le processus d'évapotranspiration du couvert est assimilé au processus de l'évaporation de l'eau libre ; la résistance du couvert ( $r_c$ ) tend alors vers zéro et l'ETR tend vers l'ETP ; la grandeur limitante, dans les deux cas, est l'énergie disponible ( $R_n$ ) plutôt que  $r_c$ .

### 3.3. Résistance du couvert de la savane

La résistance du couvert ( $r_c$ ) dépend des résistances stomatiques des feuilles de ce couvert ( $r_s$ ) 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. Pour estimer la résistance du couvert ( $r_c$ ) on a commencé historiquement par supposer que toutes les feuilles étaient semblables (mêmes caractéristiques physiologiques, même microclimat; Monteith, 1965). Saugier & Katerji (1991) 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. Nous calculerons la  $r_c$  à partir des mesures du flux de chaleur latente ( $\lambda E$ ) au dessus du couvert par la méthode micro météorologique du rapport de Bowen et nous la comparons à la  $r_c$  issue du modèle de Jarvis-Stewart (Stewart, 1988) obtenue par Founa-Toutou (2000) ; dans ces deux cas de figure, le couvert végétal fermé est assimilé à une « grande feuille » dont il faut connaître la résistance aérodynamique ( $r_a$ ). L'équation de Penman-Monteith intègre la résistance stomatique issue du modèle de Jarvis-Stewart (mesures en parallèle de résistance stomatique et des facteurs du milieu:  $R_g$ ,  $T_{air}$ , PAR,  $\Psi_{feuille}$ , de, R...). Ces deux approches permettent de faire une analyse déterministe de la résistance stomatique; dans les deux cas, la mesure de l'indice foliaire s'avère déterminante dans l'estimation de cette résistance (Nizinski, 2007).



**Figure 5** – Evapotranspiration réelle de la savane à *Loudetia arundinacea* ; valeurs cumulées obtenues par les méthodes de l'équation du bilan, de l'équation de Penman-Monteith et du rapport de Bowen, lors de la période du 18 septembre au 11 octobre 1998

Nous avons estimé la résistance moyenne journalière du couvert à partir du rapport de Bowen utilisant l'équation [13]. La résistance du couvert moyenne journalière est de  $317 \text{ s m}^{-1}$ , avec  $355 \text{ s m}^{-1}$  pour la « saison sèche » et de  $279 \text{ s m}^{-1}$  pour la « saison des pluies » (Tabl. 1). Comme attendu, la résistance du couvert lors de la « saison sèche » est supérieure de  $76 \text{ s m}^{-1}$  (24 % de  $r_c$  moyenne) à celle de la « saison des pluies », et ce dû à la différence d'indice

foliaire, l'indice foliaire « saison sèche » (1,6 - 1,9) étant inférieur à celui de « saison des pluies » (1,9 - 2,2). Nous avons comparé nos valeurs de résistance du couvert calculées à partir du rapport de Bowen à celles de Founa-Toutou (2000) obtenues du modèle de Jarvis-Stewart (Fig. 4) et qui ont été respectivement de 271 s m<sup>-1</sup> (moyenne journalière) de 372 s m<sup>-1</sup> (« saison sèche ») de 321 s m<sup>-1</sup> (« saison des pluies ») (Tabl. 1).

Dans le modèle empirique de Jarvis-Stewart, la transpiration du couvert est la somme des transpirations des feuilles composant ce couvert, le modèle suppose que toutes les feuilles possèdent les mêmes caractéristiques biologiques (âge, masse par unité de surface, teneur en azote, capacité photosynthétique, résistance stomatique minimale,...) et qu'elles sont soumises au même microclimat (éclairage, déficit de saturation de l'air, températures,...) ; le modèle donne des valeurs de résistance du couvert satisfaisantes pour les forêts et couverts épars (petit gradients à l'intérieur du couvert), mais moins satisfaisantes pour les couverts herbacés denses.

| date              | jour<br>Julien | ETP                   | rayonne-  | indice                         | vitesse                        | résistance                           | résistance  | résistance  | réten-  | transpi-          | précipi-                               | précipi-                           | inter-                         | ETR                          | ETR                              | ETR                       |
|-------------------|----------------|-----------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---|---|---|-------------------|--|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
|                   |                | de<br>Penman<br>(48)  | ment<br>net<br>R <sub>n</sub><br>mesuré<br>à 6m | foliaire<br>LAI<br>mesuré      | du vent<br>u<br>mesuré<br>à 2m | aérodyna-<br>mique<br>r <sub>a</sub> | du<br>couvert<br>r <sub>c</sub><br>modèle<br>Jarvis-<br>Stewart | du<br>couvert<br>r <sub>c</sub><br>du rapport:<br>Bowen | en eau<br>du sol<br>R/R <sub>cc</sub><br>mesuré | relative<br>T/ETP | ta-tions<br>incidentes<br>Pi<br>mesuré | ta-tions<br>au sol<br>Ps<br>mesuré | ception<br>net<br>In<br>mesuré | de<br>l'équation<br>du bilan | de<br>Penman<br>Monteith<br>(65) | du<br>rapport<br>de Bowen |
|                   |                | mm jour <sup>-1</sup> | MJ m <sup>-2</sup> jour <sup>-1</sup>           | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> | m s <sup>-1</sup>              | s m <sup>-1</sup>                    | s m <sup>-1</sup>   | s m <sup>-1</sup>                                       | %   |                   | mm                                     | mm                                 | mm                             | mm jour <sup>-1</sup>        | mm jour <sup>-1</sup>            | mm jour <sup>-1</sup>     |
| 18 sept           | 261            | 3,81                  | 9,64  | 1,65                           | 2,3                            | 241                                  | 223   | 98  | 63,4  | 0,24              | 7,9                                    | 5,7                                | 2,2                            | 2,71                         | 2,56                             | 3,13                      |
| 19 sept           | 262            | 3,41                  | 6,80  | 1,68                           | 1,9                            | 297                                  | 328   | 327   | 63,4  | 0,24              |  |                                    |                                | 0,73                         | 2,16                             | 2,16                      |
| 20 sept           | 263            | 3,14                  | 3,09  | 1,70                           | 1,8                            | 314                                  | 892   | 839   | 63,4  | 0,24              |  |                                    |                                | 0,93                         | 1,24                             | 1,54                      |
| 21 sept           | 264            | 3,98                  | 6,08  | 1,72                           | 2,3                            | 236                                  | 392   | 491   | 63,4  | 0,24              |  |                                    |                                | 0,82                         | 2,09                             | 2,01                      |
| 22 sept           | 265            | 3,85                  | 5,82  | 1,74                           | 1,9                            | 293                                  | 393   | 573   | 63,4  | 0,24              |  |                                    |                                | 0,82                         | 2,22                             | 1,86                      |
| 23 sept           | 266            | 2,11                  | 5,20  | 1,76                           | 1,7                            | 326                                  | 441   | 443   | 70,4  | 0,37              |  |                                    |                                | 1,42                         | 1,22                             | 1,67                      |
| 24 sept           | 267            | 4,38                  | 10,12   | 1,78                           | 2,7                            | 207                                  | 195   | 119   | 70,4  | 0,37              | 3,8                                    | 3,3                                | 0,5                            | 1,34                         | 2,87                             | 3,32                      |
| 25 sept           | 268            | 1,86                  | 4,47  | 1,80                           | 1,8                            | 303                                  | 492   | 500   | 70,4  | 0,37              |  |                                    |                                | 1,11                         | 0,97                             | 1,45                      |
| 26 sept           | 269            | 6,04                  | 14,18   | 1,82                           | 2,5                            | 217                                  | 145   | 117   | 70,4  | 0,37              |  |                                    |                                | 2,10                         | 4,37                             | 4,61                      |
| 27 sept           | 270            | 3,76                  | 7,30  | 1,84                           | 1,8                            | 300                                  | 306   | 245   | 70,4  | 0,37              |  |                                    |                                | 2,24                         | 2,36                             | 2,55                      |
| 28 sept           | 271            | 3,00                  | 5,56  | 1,86                           | 2,3                            | 244                                  | 385   | 284   | 70,4  | 0,37              |  |                                    |                                | 1,65                         | 1,56                             | 1,78                      |
| 29 sept           | 272            | 3,89                  | 7,65  | 1,89                           | 2,1                            | 264                                  | 273   | 229   | 70,4  | 0,37              |  |                                    |                                | 1,47                         | 2,41                             | 2,56                      |
| 30 sept           | 273            | 6,03                  | 12,32   | 1,91                           | 3,3                            | 167                                  | 156   | 148   | 92,0  | 0,76              | 91,8                                   | 86,7                               | 5,1                            | 8,58                         | 3,87                             | 3,95                      |
| 1 oct             | 274            | 4,11                  | 7,89  | 1,93                           | 2,7                            | 202                                  | 239   | 296   | 92,0  | 0,76              |  |                                    |                                | 3,53                         | 2,77                             | 2,58                      |
| 2 oct             | 275            | 1,70                  | 4,54  | 1,96                           | 1,8                            | 316                                  | 512   | 482   | 92,0  | 0,76              |  |                                    |                                | 2,11                         | 1,02                             | 1,46                      |
| 3 oct             | 276            | 3,23                  | 7,56  | 1,99                           | 2,2                            | 254                                  | 244   | 223   | 92,0  | 0,76              |  |                                    |                                | 2,47                         | 2,31                             | 2,36                      |
| 4 oct             | 277            | 4,59                  | 8,29  | 2,02                           | 2,9                            | 194                                  | 232   | 314   | 92,0  | 0,76              |  |                                    |                                | 3,75                         | 3,04                             | 2,71                      |
| 5 oct             | 278            | 4,39                  | 7,95  | 2,05                           | 2,2                            | 248                                  | 240   | 359   | 92,0  | 0,76              |  |                                    |                                | 2,89                         | 3,09                             | 2,70                      |
| 6 oct             | 279            | 4,16                  | 8,01  | 2,08                           | 2,6                            | 210                                  | 243   | 287   | 92,0  | 0,76              |  |                                    |                                | 3,33                         | 2,75                             | 2,59                      |
| 7 oct             | 280            | 4,45                  | 8,50  | 2,10                           | 2,4                            | 226                                  | 224   | 308   | 89,9  | 0,72              | 8,8                                    | 8,0                                | 0,7                            | 4,61                         | 3,09                             | 2,77                      |
| 8 oct             | 281            | 2,39                  | 4,15  | 2,13                           | 2,0                            | 283                                  | 468   | 502   | 89,9  | 0,72              |  |                                    |                                | 2,56                         | 1,37                             | 1,33                      |
| 9 oct             | 282            | 3,60                  | 8,88  | 2,16                           | 2,1                            | 265                                  | 200   | 145   | 89,9  | 0,72              |  |                                    |                                | 1,97                         | 2,69                             | 2,89                      |
| 10 oct            | 283            | 2,65                  | 7,56  | 2,19                           | 1,5                            | 366                                  | 220   | 45  | 89,9  | 0,72              |  |                                    |                                | 2,50                         | 2,08                             | 2,50                      |
| 11 oct            | 284            | 3,04                  | 6,47  | 2,22                           | 2,2                            | 256                                  | 270   | 239   | 89,9  | 0,72              |  |                                    |                                | 2,18                         | 2,04                             | 2,12                      |
| 18 au 29 sept     |                | 3,60                  | 7,16  | 1,77                           | 2,09                           | 270                                  | 372   | 355   | 67,48   | 0,32              | 11,64                                  | 8,97                               | 2,67                           | 1,45                         | 2,17                             | 2,39                      |
| minimale          |                | 1,86                  | 3,09  | 1,65                           | 1,69                           | 207                                  | 145   | 98  | 63,36   | 0,24              |  |                                    |                                | 0,73                         | 0,97                             | 1,45                      |
| maximale          |                | 6,04                  | 14,18   | 1,89                           | 2,66                           | 326                                  | 892   | 839   | 70,42   | 0,37              |  |                                    |                                | 2,71                         | 4,37                             | 4,61                      |
| 29 sept au 11 oct |                | 3,69                  | 7,68  | 2,06                           | 2,32                           | 249                                  | 271   | 279   | 91,13   | 0,74              | 100,50                                 | 94,69                              | 5,81                           | 3,37                         | 2,51                             | 2,50                      |
| minimale          |                | 1,70                  | 4,15  | 1,91                           | 1,51                           | 167                                  | 156   | 45  | 89,85   | 0,72              |  |                                    |                                | 1,97                         | 1,02                             | 1,33                      |
| maximale          |                | 6,03                  | 12,32   | 2,22                           | 3,30                           | 366                                  | 512   | 502   | 92,04   | 0,76              |  |                                    |                                | 8,58                         | 3,87                             | 3,95                      |
| 18 sept au 11 oct |                | 3,65                  | 7,42  | 1,91                           | 2,20                           | 260                                  | 321   | 317   | 79,30   | 0,53              | 112,14                                 | 103,66                             | 8,48                           | 2,41                         | 2,34                             | 2,44                      |
| minimale          |                | 1,70                  | 3,09  | 1,65                           | 1,51                           | 167                                  | 145   | 45  | 63,36   | 0,24              |  |                                    |                                | 0,73                         | 0,97                             | 1,33                      |
| maximale          |                | 6,04                  | 14,18   | 2,22                           | 3,30                           | 366                                  | 892   | 839   | 92,04   | 0,76              |  |                                    |                                | 8,58                         | 4,37                             | 4,61                      |

**Tableau 1** – Evapotranspiration réelle et de la résistance du couvert de la savane à *Loudetia arundinacea*, valeurs obtenues par les méthodes de l'équation du bilan, de l'équation de Penman-Monteith et du rapport de Bowen lors de la période du 18 septembre au 11 octobre 1998

Connaissant la résistance du couvert obtenue par le rapport de Bowen et connaissant l'indice foliaire, on peut calculer la résistance stomatique moyenne d'une feuille (pour un pas de temps de 20 minutes, temps de scrutation du rapport de Bowen) et la comparer avec la résistance stomatique moyenne issue du modèle Jarvis-Stewart et avec les résistances stomatiques d'un échantillon optimal de feuilles, résistances mesurées au poromètre de façon synchrone. Cette méthode du rapport de Bowen associée à des mesures de pométrie, permet d'analyser « l'indice foliaire efficace » (surface des feuilles qui participent effectivement au flux transpiratoire) qui peut être décomposée par strate et pour différents pas de temps.

#### 4. Conclusion

La méthode du rapport de Bowen a permis de quantifier l'évapotranspiration réelle de la savane à partir des mesures des gradients de température et d'humidité de l'air, du rayonnement net et du flux de chaleur dans le sol. Ses avantages en sont la rapidité de mise en place du dispositif de mesure, une résolution temporelle des mesures inférieure à une heure, une continuité des mesures, une bonne intégration des hétérogénéités du flux de chaleur latente d'évaporation du couvert, sachant que les exigences d'application de la méthode sont : un peuplement considéré comme homogène horizontalement et verticalement, une surface de peuplement dont la plus petite dimension est cent fois supérieure à la hauteur de ce peuplement, un pas de temps égal ou supérieur à vingt minutes, des flux de chaleur et de masse verticaux seulement.

Le choix du laboratoire mobile a permis de faire un « *screening* » systématique de la savane à des moments remarquables du cycle phénologique et de faire en parallèle d'autres mesures des potentiels hydriques des feuilles et du sol, l'indice foliaire. Ce dispositif est adapté aux recherches agro-météorologiques et éco-physiologiques faites en milieu tropical avec des équipes restreintes. Pour des couverts herbacés denses comme c'est le cas d'une savane, la méthode du rapport de Bowen permettra d'analyser « l'indice foliaire efficace » (surface des feuilles qui participent effectivement au flux transpiratoire).

#### Remerciements

Cette étude a été financée par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Les auteurs remercient Jean-Baptiste Diazenza, pour son aide sur le terrain.

#### Bibliographie

- AMARAKOON, D., CHEN, A. et MCLEAN, P., 2000 : Estimating daytime latent heat flux and evapotranspiration in Jamaica. *Agricultural and Forest Meteorology*, **102**, 113-124.
- BOUILLET, J.P., LACLAU, J.P., NIZINSKI, J.J. et NZILA, J.D., 1999 : La Fertilité des sols sous Eucalyptus: Impact des plantations autour de Pointe Noire (Congo). *Le Flamboyant*, **49**, 26-28.
- BOWEN, I.S., 1926 : The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, **27**, 779-787.
- BRUNT, D., 1939 : *Physical and Dynamical Meteorology*. University Press, Cambridge, 450 pages.
- FOUNA-TOUTOU, E.C., 2000 : Eléments écophysologiques d'une plantation d'Eucalyptus et d'une savane au Kouilou, Congo, Diplôme de fin d'études d'Ingénieur, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, 39 pages.
- HEILMAN, J.L. et BRITTIN, C.L., 1989 : Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, **44**, 261-296.
- MONTEITH, J.L., 1965 : Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms. *Symposia of the Soc. Exp. Biol.*, New York, Academic Press, **19**, 205-234.

NIZINSKI, J.J., 2007 : Etude et modélisation des échanges de masse et d'énergie dans les couverts végétaux. Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Orléans, Orléans, 357 pages.

NIZINSKI, J.J., LOUMETO, J.J., AYOMA, M.B., MABIALA, A. et NSEMI, R.N., 2001 : Durabilité de plantations d'Eucalyptus dans le bassin du Kouilou (Congo), *Le Flamboyant*, **54**, 14-17.

NIZINSKI, J.J., MORAND, D., LOUMETO, J.J., GALAT-LUONG, A. et GALAT, G., 2008 : Bilan hydrique comparé d'une savane et d'une plantation dans le bassin du Kouilou (Congo-Brazzaville), *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, **5** (sous presse).

OHMURA, A., 1982 : Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio fluxer calculations. *Journal of Applied Meteorology*, **21**, 595-598.

PAW, U.K.T. et MEYERS, T.P., 1989 : Investigations with a higher-order canopy turbulence model into mean source-sink levels and bulk canopy resistances. *Agricultural and Forest Meteorology*, **47**, 259-271.

PENMAN, H.L., 1948 : Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, **193**, 120-145.

PHILIP, J.R., 1987 : A physical bound on the Bowen ratio. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **26**, 1043-1045.

REVFEIM, K.J.A. et JORDAN, R.B., 1976 : Precision of evaporation measurements using the Bowen ratio. *Boundary-Layer Meteorology*, **10**, 97-111.

RIOU, C., 1975 : La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. ORSTOM, Paris, 236 pages.

SAUGIER, B. et KATERJI, N., 1991 : Some plant factors controlling evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, **54**, 263-277.

STEWART, J.B., 1988 : Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **43**, 19-35.

THOM, A.S., 1972 : Momentum, mass and heat exchange of vegetation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **98**, 124-134.

VENNETIER, P., 1968 : Pointe Noire et façade maritime du Congo-Brazzaville. ORSTOM, Paris, 458 pages.

# 10. MODELISATION DU BILAN DE L'EAU D'UNE FORET. APPLICATION A UNE FUTAIE DE CHENES (Nizinski & Saugier, 1989<sup>20</sup>)

*Agricultural and Forest Meteorology*, 47 (1989) 1-17  
Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam — Printed in The Netherlands

1

## A MODEL OF TRANSPIRATION AND SOIL-WATER BALANCE FOR A MATURE OAK FOREST

JERZY NIZINSKI

*Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération,  
O.R.S.T.O.M., 213, Rue La Fayette, 75 480 Paris Cedex 10 (France)*

BERNARD SAUGIER

*Laboratoire d'Ecologie Végétale, Bâtiment 362, Université de Paris-Sud, 91 405 Orsay Cedex 07  
(France)*

(Received January 15, 1988; revision accepted September 26, 1988)

### ABSTRACT

Nizinski, J. and Saugier, B., 1989. A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. *Agric. For. Meteorol.*, 47: 1-17.

A hydrological model for the development of the soil-water content in a 120-year-old oak stand (*Quercus petraea*) is presented with a 1-day time resolution. The model was conceived for working with daily potential evapotranspiration, throughfall and leaf area index data. It predicts transpiration from the dry canopy and soil-water content. The canopy is considered as a single leaf (the Penman-Monteith equation) which entails measurements of the physiological control of vapour flow from the leaf such as stomatal resistance (porometer), leaf water potential (pressure chamber), leaf area index, root distribution and soil-water potential (tensiometers). The model estimates the daily leaf water potential that controls the opening of the stomata which in turn regulate the transpiration flow by equating soil moisture abstraction and transpiration. The model was tested using data for the growing seasons of the Fontainebleau forest near Paris (France) in 1981, 1982 and 1983. Simulated transpiration and soil-water content correlated well with neutron probe measurements of the soil-water content. The model can be used for the quantification of tree water stress, which has numerous applications such as assessing stand productivity, disease and insect epidemic susceptibility, fire danger rating and nutrient cycling.

### INTRODUCTION

Transpiration in a deciduous forest is a continuous process during the foliated phase and is quantitatively important amounting to 75% of precipitation during that period ( $E_t = 333 \text{ mm year}^{-1}$  for average European tree species; Roberts, 1983). A quantitative estimate of transpiration flux required an investigation of water potential gradients and pathway resistances, as indicators of differential energy involved in the movement of liquid water (through the

0168-1923/89/\$03.50

© 1989 Elsevier Science Publishers B.V.

<sup>20</sup> Nizinski J.J. & Saugier B., 1989. A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 47, 1-17

soil, roots, stems, branches and the stomatal cavity) as well as that of water vapour (from the stomatal cavities into the air). The component potentials and resistances are subjected to temporal and spatial variations determined by climatic parameters and plant properties (Passioura, 1982). Deciduous forest transpiration seems essentially to be governed by foliage development and stomatal regulation (Stewart, 1983; Morton, 1984; Halldin et al., 1984). Although it is easy to model the prediction of the leaf area index (Nizinski and Saugier, 1988b), it is not so for stomatal aperture which is affected by environmental factors such as light, CO<sub>2</sub> concentration, leaf water status, air humidity, temperature or other factors such as leaf age, nutrition, disease and gaseous pollutants (O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc.). The effect of these factors is difficult to quantify in the natural environment (Jones, 1983). The approach widely used in published forest transpiration models (Jarvis, 1976; Calder, 1977; Federer, 1979; Bringfelt, 1982; Halldin et al., 1984; Kowalik and Eckersten, 1984) is the regression of stomatal resistance against leaf water potential and/or specific humidity deficit and/or irradiance. The present paper presents a soil-water balance where transpiration is governed by a relationship between the stomatal resistance ( $r_s$ ) and leaf water potential ( $\psi_1$ ), the relationship changing with leaf age. The model is derived from the work of Saugier (1974), inspired by Cowan's study (1965), in which the so-called self-regulation of the plant water balance is brought about by capillary flow in the soil-plant-atmosphere continuum. Thus the model estimates the daily leaf water potential by equating transpiration and water uptake by roots. In Saugier's (1974) model developed for a natural grassland (*Agropyrum dasystachyum*), the empirical ratio of  $r_s$  to  $\psi_1$  is constant for different values of the leaf-area index. In contrast to grassland where the leaf turnover is continuous, leaf production and senescence in deciduous tree species occur at different times of year. There is a given production of leaves ( $LAI_{max}$ ) which is stable during the entire vegetative season and then decreases as senescence sets in. Therefore the ratio  $r_s/\psi_1$  is related to leaf age.

## MODEL DESCRIPTION

### *Soil-water content*

Figure 1 presents a schematic plan of the model, whose output is the daily soil-water content ( $S$ ). It is based on the water balance equation where the water balance of the root zone is the difference between the input, i.e. throughfall ( $P_n$ ) and the output, i.e. drainage from the root zone ( $D$ ) and water uptake by roots ( $U$ ). According to Fardjah and Lemée (1980), the litter has a protective function (self-mulching), thus in the model, evaporation occurred in the litter only. The soil profile is supplied only by throughfall, the daily value of which was calculated from the interception model of Nizinski and Saugier

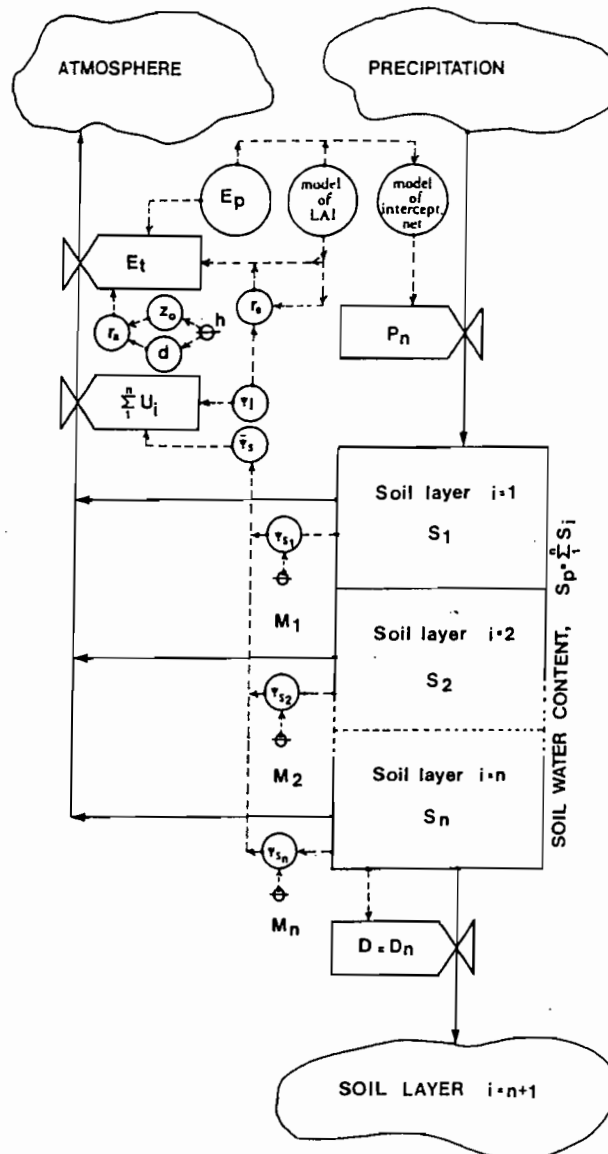


Fig. 1. Functional scheme of the soil-water content model ( $U_i$ : water uptake by roots in layer  $i$ ;  $D_i$ : drainage from layer  $i$ ;  $E_p$ : potential evaporation;  $E_t$ : transpiration;  $LAI$ : leaf area index;  $P_n$ : throughfall;  $M_i$ : length of the roots in layer  $i$ ;  $S_i$ : soil-water content of layer  $i$ ;  $d$ : zero plane displacement height;  $h$ : height of the forest;  $i$ : index of the soil layer;  $n$ : number of the soil layers;  $r_s$ : stomatal resistance;  $r_a$ : aerodynamic resistance;  $z_0$ : roughness height;  $\psi_1$ : leaf water potential;  $\psi_i$ : water potential of soil layer  $i$ ).

(1988a). As the maximum daily precipitation at Fontainebleau was 71 mm day<sup>-1</sup> (30 July 1947 and 1 August 1981), it is assumed that the soil at this site never attained saturated hydraulic conductivity and that run-off did not therefore exist (estimated by Fardjah (1978), the in situ saturated hydraulic conductivity of soils in Fontainebleau forest for the less-permeable pedologic horizon B is equal to  $k_s = 6.1 \times 10^{-6}$  m s<sup>-1</sup> or 527 mm day<sup>-1</sup>). The soil profile is composed of  $n$  layers ( $i$ ) with each layer being characterized by its soil-water retention thresholds, i.e. the maximum at field capacity ( $S_{FCi}$ ) and the minimum at wilting point ( $S_{WPi}$ ). The soil layers are seen as  $n$  tanks in series. Each layer drains to the layer below when the volume of water drained from the preceding layer ( $D_{(i-1)}$ ) added to the volume already present ( $S_{i(d-1)}$ ) and reduced by the water volume taken up by roots ( $U_i$ ) is greater than the field capacity of this layer ( $S_{FCi}$ ). When the soil-water content of the last layer ( $n$ ) exceeds its field capacity, there is water drainage from the root zone, thus  $D = D_n$ . Simulation starts on the first day of the year (day  $d=1$ ) and the initial condition was assumed: soil-water content of each layer equals field capacity ( $S_{i(1)} = S_{FCi}$ ). The inputs for the model, expressed daily were: potential evapotranspiration ( $E_p$ ), throughfall ( $P_n$ ) and leaf area index ( $LAI$ ). Four main parameters were used: the ratio of stomatal resistance to leaf water potential ( $r_s/\psi_1$ ), distribution of root length ( $M_i$ ), field capacity and wilting point of each soil layer ( $S_{FCi}$  and  $S_{WPi}$ ).

### *Transpiration*

In the model, the water uptake by roots is equal to transpiration (conservation of water flow from soil to the stomatal cavities) and water flow through all the roots, the stem, all the branches, all the leaves (liquid water flow) and the water vapour through the stomata into the air (water vapour phase) are equal and make up the transpiration flow.

#### *Liquid water flow — water uptake by roots*

Each layer ( $i$ ) which is considered homogeneous has its characteristic soil-water retention and root distribution. This implies that the water uptake by roots is regular and equal over the whole depth of each layer. The total water uptake by roots over the whole soil profile was calculated using the mean soil-water potential ( $\psi_s$ ) obtained from the soil-water potentials of the  $n$  layers ( $\psi_{si}$ ) weighted by the coefficient ( $C_i$ ) which is expressed as the ratio of root lengths in the soil layer  $i$  ( $M_i$ ) to the total root lengths in the root zone ( $M$ ) (Van Bavel and Ahmed, 1976). Thus, the water uptake by roots in the soil layer  $i$  can be described as

$$U_i = ((\psi_{si} - \psi_1)/R) C_i \quad (\text{mm day}^{-1}) \quad (1)$$

where  $\psi_{si}$  = soil-water potential of layer  $i$  (bar);  $\psi_1$  = leaf water potential (bar);

$R$  = total resistance along the soil-plant pathway and the whole equal to: (a) soil hydraulic resistance for water flow in the soil, from soil to root surface hairs; (b) hydraulic resistance of the plant to waterflow, i.e. root epidermis, xylem and mesophyll hydraulic resistances ( $\text{bar day}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ). The value for the resistance to liquid water flow in the plant, taken from the literature, is constant and of the magnitude  $R=0.5 \text{ bars day}^{-1} \text{mm}^{-1}$  (Saugier, 1974);  $C_i$  = fraction of the total root length found in the soil layer  $i$ . The water uptake by roots in the total soil profile is therefore

$$U = \sum_1^n U_i = (\psi_s - \psi_1)/R \quad (\text{mm day}^{-1}) \quad (2)$$

where  $\psi_s = \sum \psi_{si} C_i$  = average soil-water potential (bar);  $U$  = water uptake by roots in the whole soil profile ( $\text{mm day}^{-1}$ );  $n$  = number of layers in the soil profile. For equal soil-water potentials the soil-water uptake by roots will be linearly proportional to the root length.

#### *Soil-water potential*

The soil-water potential for each soil layer  $i$ , on day  $d$ ,  $\psi_{si}$ , was calculated from the soil-water content of the layer on day  $d-1$ ,  $S_{i(d-1)}$ , expressed as a volumetric water content

$$\Theta_{i(d-1)} = (S_{i(d-1)}/h_i) 1000 \quad (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}) \quad (3)$$

where  $\Theta_{i(d-1)}$  = volumetric water content of the soil layer  $i$ , day  $d-1$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $h_i$  = layer thickness (m). The soil-water potential of layer  $i$  is given by Gardner (1960) as

$$\psi_{si} = A_i (\Theta_{i(d-1)})^{B_i} \quad (\text{bar}) \quad (4)$$

where  $A_i$  and  $B_i$  = coefficients dependent on the hydraulic characteristics of the soil layer  $i$ .

#### *Water vapour flow — transpiration*

The water vapour flow through the stomata is equal to the water vapour pressure gradient divided by the resistance to vapour transport through the stomata, cuticle and leaf boundary layer. For this simulation, Monteith's (1965) method was adopted, where the evaporative surface was considered as a single layer in which the mean stomatal resistance of the canopy is equal to the sum of the stomatal resistance of all the leaves. Thus the transpiration,  $E_t$ , rate from a forest canopy can be quantitatively expressed as follows

$$E_t = E_p (1 + (\gamma/(\Delta + \gamma)) (r_s/(LAI r_a))) \quad (\text{mm day}^{-1}) \quad (5)$$

where  $\gamma$  = psychrometric constant ( $\text{mb K}^{-1}$ );  $\Delta$  = slope of the saturation vapour pressure vs. temperature curve ( $\text{bar K}^{-1}$ );  $r_s$  = stomatal resistance ( $\text{s m}^{-1}$ );  $LAI$  = leaf area index;  $r_a$  = aerodynamic resistance ( $\text{s m}^{-1}$ );  $E_p$  = potential

evapotranspiration calculated by Penman's (1948) formula ( $\text{mm day}^{-1}$ ) modified by van Bavel (1966)

$$E_p = (\Delta R_n + \rho c_p \delta e / r_a) / L(\Delta + \gamma) \quad (\text{mm day}^{-1}) \quad (6)$$

where  $R_n$  = net radiation ( $\text{W m}^{-2}$ );  $\rho c_p$  = heat capacity of air at constant pressure ( $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ );  $\delta e$  = saturation pressure deficit of air (mb);  $L$  = latent heat of vapourization of water ( $\text{J kg}^{-1}$ ;  $2.46 \times 10^6$ ).

#### *Aerodynamic resistance*

The turbulent diffusion resistance for heat and water vapour flow from the leaf boundary layer into the atmosphere ( $r_a$ ) is related to wind speed and forest height. Under neutral stability conditions  $r_a$  is given by Monteith (1965) as

$$r_a = (1/(k^2 u)) (\ln(z-d)/z_0)^2 \quad (\text{s m}^{-1}) \quad (7)$$

where  $k$  = von Karman constant (0.39);  $u$  = wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ );  $z$  = height above ground (m);  $z_0$  = roughness height (m);  $d$  = zero plane displacement height (m). In the absence of wind profile data,  $d$  and  $z_0$ , the surface roughness parameters, were estimated according to an empirical formula which relates both parameters to mean tree height (Thom, 1971)

$$d = 0.75h \quad (\text{m}) \quad (8)$$

$$z_0 = 0.10h \quad (\text{m}) \quad (9)$$

#### *Stomatal resistance*

Decrease in plant water content causes a decrease in leaf water potential ( $\psi_1$ ). If the leaf water potential reaches a given threshold, i.e. the critical leaf water potential  $\psi_{1\text{crit}}$ , then tree water status begins to affect the stomatal resistance and stomatal closure begins. Different trees appear to have different thresholds for stomatal closure (Hsiao, 1973) but threshold values in deciduous trees generally range from  $-13$  to  $-25$  bar (Federer, 1977) (for *Q. petraea*  $\psi_{1\text{crit}} = -15.7$  bar was calculated). Field measurements in the *Q. petraea* stand (Fig. 2b), suggested an empirical model for stomatal resistance in terms of leaf water potential and leaf age (Nizinski and Saugier, 1989)

(1) when  $\psi_1 > -25.5$  bar with  $r_{\text{smax}}^* = 1.58 \text{ s mm}^{-1}$

$$r_s = ((r_{\text{smax}}^* - r_{\text{smin}}) / (\psi_{1\text{max}} - \psi_{1\text{crit}})) (\psi_1 - \psi_{1\text{crit}}) + r_{\text{smin}} \quad (\text{s mm}^{-1}) \quad (10)$$

(2) when  $\psi_1 \leq -25.5$  bar

$$r_s = r_{\text{smax}} = 2.27 \text{ s mm}^{-1}$$

where  $r_s$  = mean stomatal resistance ( $\text{s mm}^{-1}$ );  $r_{\text{smax}}^*$  = theoretical maximal stomatal resistance ( $\text{s mm}^{-1}$ );  $r_{\text{smin}}$  = minimal stomatal resistance ( $\text{s mm}^{-1}$ );  $\psi_{1\text{max}}$  = maximum leaf water potential (bar) and  $\psi_{1\text{crit}}$  = critical leaf water potential (bar).

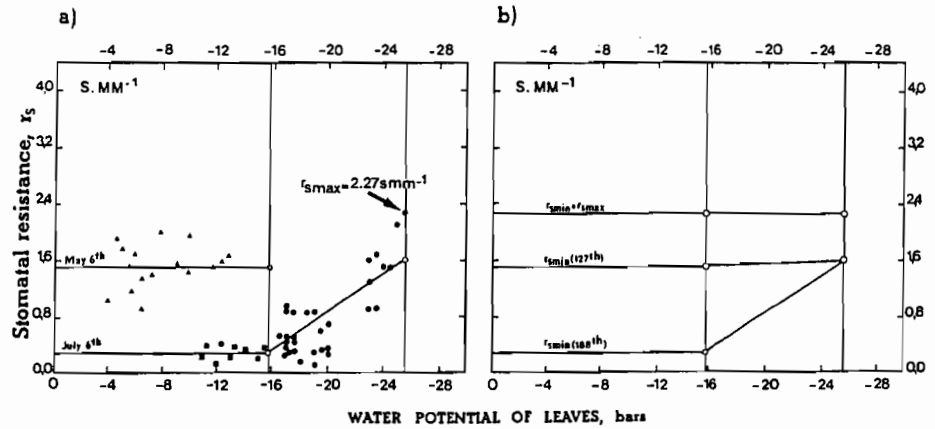


Fig. 2. Variations in the mean leaf stomatal resistance of the forest ( $r_s$ ) with the mean leaf water potential of the canopy ( $\psi_1$ ) for *Quercus petraea*. (a) Field measurements on different days during the 1983 growing season; (b) model (see eq. 10).

#### Leaf water potential

According to eq. 2, if the leaf water potential is less than or equal to the soil-water potential then water uptake by roots is nonexistent

$$\text{if } \psi_1 \leq \psi_s \text{ then } \sum_1^n U_i \simeq 0 \quad (\text{mm day}^{-1})$$

Otherwise, the water uptake by roots is equal to canopy transpiration

$$\sum_1^n U_i \simeq E_t \quad (\text{mm day}^{-1}) \quad (11)$$

Then using eqs. 2 and 5, eq. 11 becomes

$$(\psi_s - \psi_1)/R \simeq E_p / (1 + (\gamma/(\Delta + \gamma)) (r_s / (LAI r_a))) \quad (\text{mm day}^{-1})$$

Upon rearrangement the actual leaf water potential ( $\psi_1$ ) is given by

$$\psi_1 = R(E_p / (1 + \gamma/(\Delta + \gamma)) (r_s / (LAI r_a))) + \psi_s \quad (\text{bar}) \quad (12)$$

This is an implicit equation, because  $r_s$  depends on  $\psi_1$  (eq. 10). Thus, to estimate the actual leaf water potential an iterative technique has to be employed (Rose et al., 1976). The steps of the iteration are as follows (Fig. 3): take  $\psi_1 \geq \psi_{1\text{crit}}$  so  $r_s = r_{s\text{min}}$ , if  $U > E_t$  then take  $\psi_1 \leq \psi_{1\text{crit}}$  so  $r_s = r_{s\text{max}}$ , if  $U < E_t$  then  $\psi_{1\text{crit}} > \psi_1 > \psi_{1\text{max}}$  and  $r_{s\text{min}} < r_s < r_{s\text{max}}$ . Thus, the solution ( $U \simeq E_t$ ) is between  $\psi_{1\text{crit}}$  and  $\psi_{1\text{max}}$ . The next step is to take  $\psi_1 = (\psi_{1\text{crit}} + \psi_{1\text{max}})/2$ . The calculations are repeated to obtain a final value of  $\psi_1$  until the difference between calculated value of water uptake and transpiration is smaller than initial accuracy  $\alpha$  (taken arbitrarily).

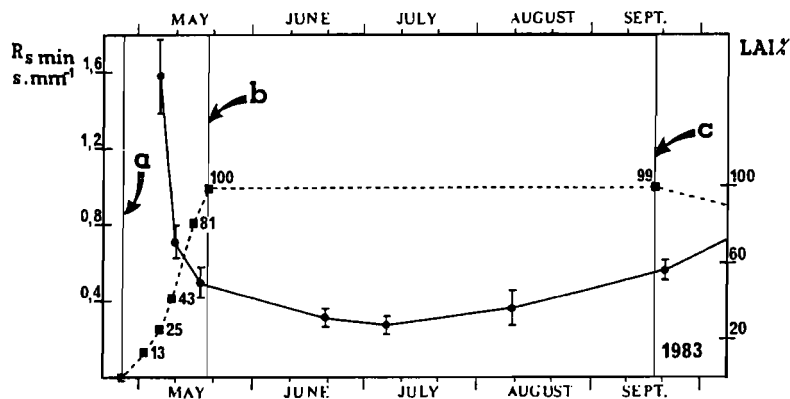


Fig. 3. Changes in minimal stomatal resistance with leaf age in *Quercus petraea* at Fontainebleau forest during the 1983 growing season ( $r_{\text{amin}}$  (●) = minimal stomatal resistance; LAI (■) = leaf area index; a = budburst day; b = first day of fully leaved phase; c = leaf fall).

#### SITE DESCRIPTION AND MEASUREMENTS

##### *Study site*

Field work was carried out on plot No. 267 ("Gros-Fouteau"), situated on a rise in the centre of the 22 000-ha Fontainebleau Forest near Paris (48° 26' N, 2° 41' E) at 136 m altitude. The limestone bedrock is covered with silicious, quaternary wind-blown sand. The depth of the sandy layer has determined the characteristics of the plot's soils: these are leached or podzolic. The climate of the region is partly maritime, partly subcontinental. The mean annual precipitation (1883–1983) is 720 mm, being fairly evenly distributed throughout the year (with a maximum of 72 mm in January and December and a minimum of 48 mm in March and 46 mm in April). The mean annual temperature is 10.2°C (average of monthly means of 18.2°C in July and 2.2°C in January). The overstory canopy is exclusively 120-year-old oaks (*Q. petraea*). The mean tree height is 30 m, stand density is 182 trees ha<sup>-1</sup> and the total basal area is 33.8 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. The understory consists mainly of seedlings and beech saplings (*Fagus sylvatica*). According to Lemée (1966), the vegetation of the sample site is characteristic of an oak stand on acid soils.

##### *Material and methods*

###### *Morpho-physiological parameter measurements*

During the growing seasons of 1982 and 1983 three main model parameters were measured in situ.

#### *Stomatal resistance*

The stomatal resistance measurements were made using a portable porometer "MK II" from "Delta T Devices" (Monteith and Bull, 1970) on randomly-selected leaf samples in the tree canopy; in total 50 sampled leaves day<sup>-1</sup>.

#### *Leaf water potential*

After stomatal resistance measurements, the leaf was separated from the branch with a razor blade at the leafstalk base and inserted into a pressure chamber (PMS Inst. Co., Corvallis, Oregon, U.S.A.; error range  $\pm 0.5$  bars). The technique for estimating the plant water status using a pressure chamber is described in detail by Ritchie and Hinckley (1975).

#### *Root distribution*

The roots were harvested on 18 February 1983, from a pit reaching the limestone slab (limit of the soil profile), at a depth from 0.7 to 1.0 m, between two mature trees, 8 m apart. The roots were extracted from 1-dm<sup>3</sup> cubes of soil taken from three pedological horizons; in total 24 samples. The roots were graded by size: (a) "small roots" having a diameter equal or smaller than 1 mm, and regarded as absorptive roots; (b) "large roots" with a diameter larger than 1 mm and regarded as non-absorptive roots. For each layer the total length of the small roots was estimated using the line intersection method described by Newman (1966).

#### *Soil-moisture measurements*

##### *Soil-water content*

The neutron probe "Solo" made at the Centre d'Etudes Nucléaires in Cadarache was used. The neutron probe calibration was established by Fardjah (1978) using the gravimetric technique. The measurement device is composed of nine permanent access tubes that reach down to the limestone slab. Measurements were made in each tube every 10 cm from the soil surface (from 29 January 1981 to 21 December 1983) every 20–30 days during the non-foliated phase and weekly during the foliated phase. The soil-water content sum (expressed in mm) of each layer of the tube makes up the tube (profile) soil-water content. For each layer of each tube, the mean soil-water content measured during the non-foliated phase (transpiration nonexistent) was considered as the field capacity value and the lowest value of the soil-water content measured at the research plot during the 3-year study period was used as the permanent wilting point. The difference between the field capacity value and the permanent wilting point value made up the "available water" content of each soil layer and the sum of the layer's "available water" content made up the "available water" of the soil profile.

### *Volume-potential curves*

The volumetric water content was plotted relative to the soil-water potential for all the layers in the nine access tubes on the following basis: (1) the volumetric soil-water content measurements ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ); (2) soil-water potential: (a) at the field capacity ( $S_{\text{FC}}$ ) of  $\psi_{\text{SFC}} = -0.1$  bars and at permanent wilting point ( $S_{\text{WP}}$ ) of  $\psi_{\text{SWP}} = -16$  bars for sandy soils (Rutter, 1975); (b) obtained from measurements at the study site for the soil-water potential range within  $-0.1$  and  $-0.8$  bars, using "soil moisture" tensiometers.

## RESULTS AND DISCUSSION

### *Morpho-physiologic parameters*

#### *Stomatal resistance/leaf water potential*

The response of stomata to the development of leaf water potential has three distinguishable curve phases (Fig. 2a) according to eq. 10.

(1) *First phase.* If the leaf water potential is greater than or equal to the critical leaf water potential ( $\psi_{1\text{crit}} = -15.7$  bars) then the stomatal resistance is constant and a minimum for the given leaf age (minimal stomatal resistance changes with leaf age). Figure 3 illustrates this development during the 1983 growing season, from budburst day (26 April) to leaf senescence (26 October). Eleven days after budburst, stomatal resistance closed to  $1.58 \pm 0.19 \text{ s mm}^{-1}$  for the leaf area index equal to 21% of the maximum leaf area index ( $LAI_{\text{max}} = 4.38$ ). The leaf surface increase corresponded to the rapid decrease of minimal stomatal resistance ( $r_{\text{smin}}$ ), with  $r_{\text{smin}}$  being equal to  $0.5 \pm 0.08 \text{ s mm}^{-1}$  when the leaf area index is maximal (18 May). This decrease continued until its lowest minimum value of  $0.29 \pm 0.03 \text{ s mm}^{-1}$  on 6 July, after which the value of  $r_{\text{smin}}$  increased from 0.29 to  $0.56 \pm 0.02 \text{ s mm}^{-1}$  (21 September). On 21 September, leaf senescence began ( $LAI = 99\%$  of  $LAI_{\text{max}}$ ), reaching  $0.74 \pm 0.12 \text{ s mm}^{-1}$  on 26 October ( $LAI = 75\%$  of  $LAI_{\text{max}}$ ). This first phase is represented by the straight line series  $r_{\text{smin}} = \text{constant}$  for  $\psi_1 \geq \psi_{1\text{crit}}$ .

(2) *Second and third phases,* i.e. the stomatal regulation phase. According to the measurements, the relationship between leaf water potential and stomatal resistance is an exponential function (Ritchie and Hinckley, 1975) for a given leaf age. This stomatal regulation phase can be expressed by the exponential curve series, but in view of scattered experimental points and the fact that the numerical resolution of Rose et al. (1976) to estimate the leaf water potential was used (Figs. 2b and 4), each exponential function was reduced to two linear functions.

(a) The first linear function is expressed by eq. 13. This is the second phase.

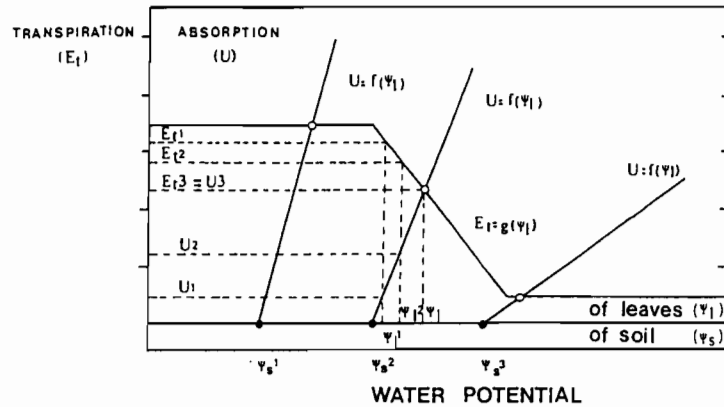


Fig. 4. Scheme of leaf water potential estimation (see "Leaf water potential").

$$r_s = b - a |\psi_1| \quad (\text{for } \psi_{1\text{crit}} > \psi_1 > \psi_{1\text{max}}) \quad (\text{s mm}^{-1}) \quad (13)$$

With leaf age increasing until the beginning of July,  $a$  increases and  $b$  decreases, after which the trend is reversed. Thus this relationship expressed for 20 July 1983 is:  $r_s = 0.132|\psi_1| - 1.778$  ( $\text{s mm}^{-1}$ ). The critical leaf water potential value was  $-15.7$  bars, which is similar to the value obtained by Aussenac and Levy (1983) for *Q. pedunculata* ( $-14$  bars).

(b) The second linear function expressed by  $1.58 < r_s < 2.27$  ( $\text{s mm}^{-1}$ ) for  $\psi_1 > -25.5$  bars is valid for all leaf age. This is the third phase. The value of  $r_{s\text{max}}^* = 1.58$   $\text{s mm}^{-1}$  (theoretical maximal stomatal resistance) is the calculated value representing the intersection point between the eq. 12 series and this function, the values of  $r_s = 2.27$   $\text{s mm}^{-1}$  and  $\psi_1 = -25.5$  bars being the maximal measured values for stomatal resistance and leaf water potential (20 July 1983). The maximum stomatal resistance value of  $r_s = 2.27$   $\text{s mm}^{-1}$  used in the model compares with the  $r_s = 3$   $\text{s mm}^{-1}$  value obtained for *Q. pedunculata* by Aussenac and Levy (1983).

#### Root distribution

The root system of *Q. petraea* has one or more taproots which ramify on contact with the limestone slab located between 0.5 and 1.5 m of depth. The root lengths per unit soil volume change with soil depth: they are long in horizon  $A_1$  ( $1.23 \pm 0.22$   $\text{m dm}^{-3}$ ), decrease on  $A_2$  ( $0.38 \pm 0.14$   $\text{m dm}^{-3}$ ) and increase again on horizon B ( $0.9 \pm 0.33$   $\text{m dm}^{-3}$ ), the increase being greater for small roots. The root lengths per unit soil volume are similar for the four analysed soil profiles. The distribution of the root lengths per unit soil volume depends on the amount of available water ( $S_{AW}$ ) in the soil, with maximum rooting observed on  $A_1$  ( $S_{AW} = 13.2$  mm and  $M = 1.23$   $\text{m dm}^{-3}$ ), minimum rooting in  $A_2$  ( $S_{AW} = 8.8$  mm and  $M = 0.38$   $\text{m dm}^{-3}$ ), and average rooting in B

( $S_{AW}=10$  mm and  $M=0.9$  m dm<sup>-3</sup>). Thus, the trees seem to equilibrate hydraulically with "wet" areas in the soil profile (observed at Fontainebleau Forest in *Fagus sylvatica* by Fardjah and Lemée (1980)).

#### SOIL-WATER CONTENT — DISCUSSION AND CONCLUSION

A simulation of the soil-water content development was made for the 1981, 1982 and 1983 growing seasons (from budburst to leaf fall at 50% of  $LAI_{max}$ ) for nine neutron access tube sites. The simulated values for soil-water content and those measured in situ were compared (Fig. 5). To avoid ambiguity when testing the model against the average value of the stand tube No. 21 was used as a representative of the study plot. The quantitative importance of transpiration was confirmed. The mean value was 288.4 mm year<sup>-1</sup> (339.8, 241.1, 284.2 mm year<sup>-1</sup>) (76.4% of precipitation) or 1.63–2.15 mm day<sup>-1</sup> (mean growing season, 154 days duration; 158, 148, 156 days). These results correspond to those found by Ambros (1978) for *Q. pedunculata* (250–320 mm year<sup>-1</sup>), by Aussenac and Granier (1979) for *Q. petraea* (254–300 mm year<sup>-1</sup>) and by Roberts (1983) for *Q. petraea* (320–327 mm year<sup>-1</sup>). The simulated soil-water content corresponded well with the in situ measurements, although the study period covered climatically different years (with precipitation in 1981 being 1085 mm, which is 51% more than the mean annual value for 103 years (720.4 mm); the annual values for 1982 of 791 mm and for 1983 of 744.4 mm were close to the yearly mean value. The simulated soil-water content for 1982 was good, but for 1981 and 1983 it was sometimes under- or overestimated. There is a tendency to underestimate for the periods when the soil-water content nears field capacity (May, June, July, August of 1981 and at the beginning of May, 1983), and to overestimate for the "dry" periods (June, July, August, October of 1983). There are several explanations for the differences between the simulated and measured values. The net interception model (Nizinski and Saugier, 1988a) underestimated throughfall during the foliated phase in 1981. From 24 April to 6 November, the throughfall was underestimated by –9.9 mm, which can explain the underestimation of the soil-water content in May, June, July and August of 1981. The hydraulic properties of the soil were not studied experimentally. As the relationship between the soil-water potential and the soil-water content was largely based on data in the literature, the soil-water content corresponding to the given soil-water potential could be too low or too high due to hysteresis. It is possible that the *Q. petraea* roots penetrated the limestone slab cracks. In this case, the actual water uptake by roots would have been in the soil profile as well as in the limestone slab cracks. The given simulated transpiration took into account the water uptake of roots in the soil profile only, which would result in an overestimation of water uptake by the roots and consequently, an underestimation of the soil-water content. In the model, drainage occurs during a day of precipitation and in the next step of

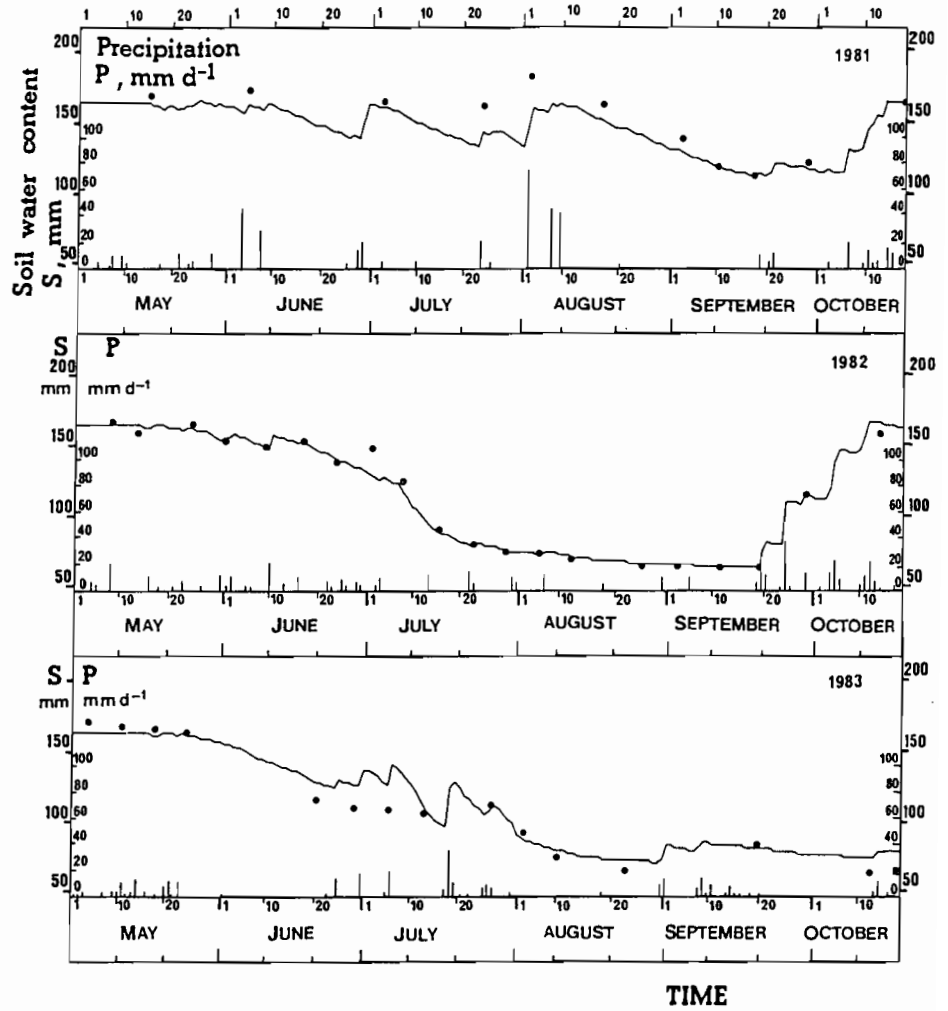


Fig. 5. Simulated (—) and measured (●) total soil-water content during the 1981, 1982 and 1983 growing seasons. Tube No. 21 (field capacity:  $S_{FC}=166.6$  mm; permanent wilting point;  $S_{WP}=63.2$  mm).

simulation (day  $d+1$ ) the actual soil-water content is equal to the field capacity. However, it seems that the actual drainage is slower. So after precipitation which causes drainage, the actual water content is above field capacity and can remain so for only 1 more day. Two examples can be given to illustrate this: (a) on 1 August 1981, after precipitation of 70.4 mm the measurement indicated  $S=188.5$  mm (2 August 1981), which is 22 mm more than field capacity; (b) after 2 days of precipitation on 15 March 1982 ( $P=9.4$  mm) and 16 March 1982 ( $P=3.5$  mm), the soil-water content measured on 17 March 1982 was

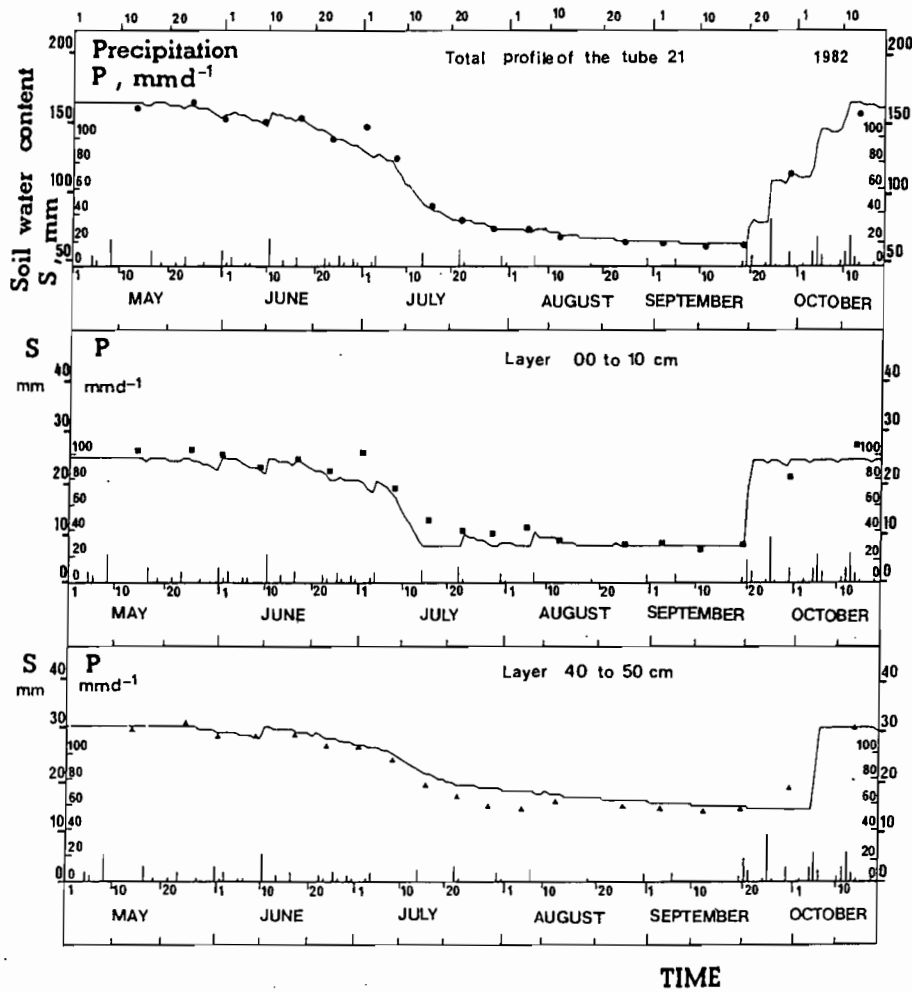


Fig. 6. Simulated (—) and measured (● ■ ▲) values for the total soil-water content in tube No. 21, for the soil layers 0–0.10 m ( $S_{FC(1)}=23.9$  mm;  $S_{WP(1)}=7.2$  mm) and 0.40–0.50 m ( $S_{FC(5)}=30.2$  mm;  $S_{WP(5)}=14.0$  mm) during the 1982 growing season.

$S=180.3$  mm, which is 13.7 mm above field capacity. In the model, rapid drainage may well lead to an underestimation of the actual soil-water content when  $S$  approaches field capacity, i.e. at the beginning or end of the vegetative season or after heavy precipitation (e.g. on 1 August 1981). In addition, the water uptake by the roots of understory trees ( $LAI_{max}=0.95$ ; height of 1–4 m) was not taken into account. This probably caused an overestimation of the simulated soil-water content.

Moreover, it seems that there is compensation between two or more of the model outputs. For example, in the 3 years of study the simulations of the soil-

water content in the total soil profile for 1982 were closest to the in situ measurements (Fig. 6), because an overestimation of the soil-water content in the 0–10 cm layer (horizon A<sub>1</sub>) was compensated for by an underestimation in the 40–50 cm layer (B horizon). This type of compensation becomes progressively more marked from May to September. Computation of water uptake in the soil layers implies that the root lengths per unit soil volume are constant in time. In fact, according to Reich et al. (1980) for *Q. alba* and to Johnson et al. (1984) for *Q. rubra* root lengths and absorption capacity show spatial and temporal variation. Future studies of the water uptake by roots in the soil profile need to emphasize dynamic and spatial aspects. Here, stomatal resistance was considered in relation to temporal variations (leaf ageing) and to spatial variations (leaf position within the tree crown). Introducing the leaf ageing parameter into the  $r_s/\psi_1$  ratio (eq. 10) improved the accuracy of the predicted transpiration, which consequently correlated well with the measured soil-water content. Leaf sampling within the crown ought to be possible to extrapolate the stomatal resistance results to the rest of the crown. Branch position, distance above ground, distance from trunk, aspect of leaves, etc. are additional complications that require careful planning prior to sampling (Nizinski, 1986). As regards pathway resistance to water flow through the soil-plant-atmosphere continuum, the total resistance for the liquid water flow ( $R$ ) was considered constant, while the stomatal resistance ( $r_s$ ) was considered to respond to changing conditions. Future models ought to integrate variations in the total resistance of liquid water flow by taking into account the development of the root lengths (or of the absorbant surfaces of roots) in the temporal perspective, as was done for the leaf area index development. Variations in stomatal resistance expressed as a function of leaf area index and leaf age for a given condition, describe the morphologic development of the leaves; progressive increase in the number of stomata per leaf surface unit, reduction of leaf hairiness, wax-filling of the stomatal pores, etc. — this has been observed for *Castanea sativa* and *Q. petraea* (Nizinski and Saugier, 1989).

#### ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Professor Georges Lemée for some of his results on the Fontainebleau forest, Pierre Doignon for the meteorological data and Bernard Legay and Jean-Yves Pontailier for field assistance.

#### REFERENCES

- Ambros, Z., 1978. Vodna bilancia lesnych porastov Karpat. Lesn. Cas., 24: 203–221.  
 Aussenac, G. and Granier, A., 1979. Etude bioclimatique d'une futaie feuille (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France. (II) Etude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. Ann. Sci. For., 36: 265–280.

- Aussenac, G. and Levy, G., 1983. Influence du dessèchement du sol sur le comportement hydrique et la croissance du chêne pédonculé (*Quercus pedunculata* Ehrl.) et du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) cultivés en cases de végétation. *Ann. Sci. For.*, 40: 251-264.
- Bringfelt, B., 1982. Air humidity and radiation influence on forest transpiration. *Agric. Meteorol.*, 26: 297-307.
- Calder, I.R., 1977. A model of transpiration and interception loss from a spruce forest in Plynlimon, Central Wales. *J. Hydrol.*, 33: 247-265.
- Cowan, I.R., 1965. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *J. Appl. Ecol.*, 2: 221-239.
- Fardjah, M., 1978. Dynamique comparée de l'eau du sol sous futaie de hêtre et en clairière à *Calamagrostis epigeios* en forêt de Fontainebleau. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Paris-Sud, Orsay, 146 pp.
- Fardjah, M. and Lemée, G., 1980. Dynamique comparée de l'eau sous hêtraie et dans des coupes nues ou à *Calamagrostis epigeios* en forêt de Fontainebleau. *Bull. Ecol.*, 11: 11-31.
- Federer, C.A., 1977. Leaf resistance and xylem potential differ among broadleaved species. *For. Sci.*, 23: 411-419.
- Federer, C.A., 1979. A soil-plant-atmosphere model for transpiration and the availability of soil water. *Water Resour. Res.*, 15: 555-562.
- Gardner, W.R., 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.*, 89: 63-73.
- Halldin, S., Saugier, B. and Pontailleur, J.-Y., 1984. Evapotranspiration of a deciduous forest: Simulation using routine meteorological data. *J. Hydrol.*, 75: 323-341.
- Hsiao, T.C., 1973. Plant response to water stress. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 24: 571-598.
- Jarvis, P.G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, 273: 593-610.
- Johnson, P.S., Novinger, S.L. and Mares, W.G., 1984. Root, shoot, and leaf area growth potentials of Northern red oak planting stock. *For. Sci.*, 30: 1017-1026.
- Jones, H.G., 1983. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge University Press, London, 323 pp.
- Kowalik, P.J. and Eckersten, H., 1984. Water transfer from soil through plants to the atmosphere in willow energy forest. *Ecol. Model.*, 26: 251-284.
- Lemée, G., 1966. Sur l'intérêt écologique des réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 113: 305-323.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. In: G.E. Fogg (Editor), *The Stage and Movement of Water in Living Organisms*. 19th Symp. Soc. Exp. Biol., The Company of Biologists, Cambridge University Press, pp. 205-234.
- Monteith, J.L. and Bull, T.A., 1970. Diffusive resistance porometer for field use. *J. Appl. Ecol.*, 7: 617-638.
- Morton, F.I., 1984. What are the limits on forest evaporation? *J. Hydrol.*, 74: 373-398.
- Newman, E.I., 1966. A method of estimating the total length of roots in a sample. *J. Appl. Ecol.*, 3: 139-145.
- Nizinski, J., 1986. Modélisation du bilan de l'eau d'une futaie de chênes en forêt de Fontainebleau. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Paris-Sud, Orsay, 171 pp.
- Nizinski, J. and Saugier, B., 1988a. Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Acta Oecol./Oecol. Plant.*, 9: 223-242.
- Nizinski, J. and Saugier, B., 1988b. A model of leaf budding and development for a mature *Quercus* forest. *J. Appl. Ecol.*, 25: 643-652.
- Nizinski, J. and Saugier, B., 1989. Dynamique de l'eau dans un chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Lieb.) en forêt de Fontainebleau. *Ann. Sci. For.*, 46 (2), in press.
- Passioura, J.B., 1982. Water in the soil-plant-atmosphere continuum. In: O.L. Lange et al. (Editors), *Physiological Plant Ecology*, Vol. 2. Springer, Berlin, pp. 5-30.

- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 193: 120-145.
- Reich, P.B., Teskey, R.O., Johnson, P.S. and Hinckley, T.M., 1980. Periodic root and shoot growth in oak. *For. Sci.*, 26: 590-598.
- Ritchie, G.A. and Hinckley, T.M., 1975. The pressure chamber as an instrument for ecological research. *Adv. Ecol. Res.*, 9: 165-254.
- Roberts, J., 1983. Forest transpiration: A conservative hydrological process? *J. Hydrol.*, 66: 133-141.
- Rose, C.W., Byrne, G.F. and Hansen, G.K., 1976. Water transport from soil through plant to atmosphere: a lumped parameters model. *Agric. Meteorol.*, 16: 171-184.
- Rutter, A.J., 1975. The hydrological cycle in vegetation. In: J.L. Monteith (Editor), *Vegetation and the Atmosphere*, Vol. 1. Academic Press, New York, pp. 111-154.
- Saugier, B., 1974. Transports de CO<sub>2</sub> et de vapeur d'eau à l'interface végétation-atmosphère. Interaction du microclimat avec le comportement physiologique de plantes prairiales. Thèse d'Etat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 155 pp.
- Stewart, J.B., 1983. A discussion of the relationships between the principal forms of the combination equation for estimating crop evaporation. *Agric. Meteorol.*, 30: 111-127.
- Thom, A.S., 1971. Momentum absorption by vegetation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 97: 414-428.
- Van Bavel, C.H.M., 1966. Potential evaporation: the combination concept and its experimental verification. *Water Resour. Res.*, 2: 455-467.
- Van Bavel, C.H.M. and Ahmed, J., 1976. Dynamic simulation of water depletion in the root zone. *Ecol. Model.*, 2: 189-212.