



Institut de Recherche pour le Développement IRD

UMR 211 « BIOEMCO - Biogéochimie et écologie des milieux continentaux »

**Flux de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère :
problèmes de l'échelle**

Conférence à la Faculté de Géographie de l'Université de Bucarest, Roumanie

Le 14 novembre 2013

JERZY JAN NIZINSKI & LILIANA ZAHARIA

(1) 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, téléphone: (33) 2-38-49-95-25; fax: (33) 2-38-49-95-76; e-mail: georges.nizinski@ird.fr

(2) University of Bucharest, Department of Geography, Bld N. Balcescu, n°1, Bucharest, 050107 Rumania, e-mail: zaharialili@hotmail.com

LISTE DES PUBLICATIONS

1. Nizinski J.J., Montoroi J.-P., Silvera N. & Lointier M., 2013. Use of the Dixon-Tyree stems hygrometer in a rubber tree plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 100-106
2. Ndiaye P.I., Galat G., Galat-Luong A. & Nizinski J.J., 2013. Note on the seasonal use of lowland and highland habitats by the West African chimpanzee *Pan troglodytes verus* (Schwarz, 1934) (Primates : Hominidae) : implications for its conservation. *Journal of Threatened Taxa*, 2013, 5 (2), p. 3697-3700
3. Nizinski J.J., Galat G. & Galat-Luong A., 2012a. Etude de la conductivité hydraulique des troncs d'hévéa: cas d'une plantation en Côte d'Ivoire. (I) Matériel et Méthodes. *Geographia Technica*, vol. 13, n°1, 61-71
4. 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. (II) Résultats et Discussion. *Geographia Technica*, vol. 13, n°2, 59-67
5. Galat G., Galat-Luong A. & Nizinski J.J., 2011. Is Lord Derby's Eland, the world's largest antelope, able to adapt its diet if dryness? *Animal biology* vol. 61, 485-492
6. 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
7. 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
8. 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
9. 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
10. Nizinski J.J., Galat-Luong A. & Galat G., 2009. Aspects bioclimatiques de nécrose corticale de l'hévéa. *Geographia Technica*, 355-360
11. 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
12. 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
13. 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
14. Nizinski J.J., Loumeto J.-J., 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
15. 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
16. 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
17. 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
18. 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
19. 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
20. 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
21. 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
22. 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
23. 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
24. 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
25. 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
26. 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
27. 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

28. 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
29. Morand D. & Nizinski J.J., 1989. L'intérêt phytothérapeutique de l'arbre à thé (*Melaleuca alternifolia*). *La Lettre Phytothérapeutique du Pharmacien*, 9, 4-10
30. 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
31. 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
32. Nizinski J.J., 1987. Résumé de la thèse. *Bulletin d'Ecologie*, vol. 18, n° 1, 73-75
33. Saugier B., Halldin S., Pontauiller 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, Juillet-Août-Septembre, 187-200
34. Galat G., Galat-Luong A., Nizinski J.J. & Coles B., 2013. *African flooded forests as refuge habitats*. In: Nowak K. (editor), *Primates of Flooded Habitats*, Cambridge University Press, London, pp. 10-33 (sous presse)
35. Nizinski J.J., & Montoroï J.-P., 2013. « Système de régulation des flux d'eau, modèle phénologique et régulation stomatique », Conférence lors de la 4^{ème} JOURNEE SCIENTIFIQUE « INTERACTIONS VEGETATION – CYCLE DE L'EAU » au Laboratoire HydroSciences à Montpellier, Polycopié, 63 pages
36. Nizinski J.J. & Szczegieliński C., 2013. *Synthèse des conclusions du symposium européen problèmes actuels de la protection contre les inondations*. Paris : AITPF, 2013, 8 p. Symposium Européen : Problèmes Actuels de la Protection contre les Inondations, Paris ; Orléans (FRA), 2012/03/28-30
37. Nizinski J.J., 2013. Zastosowania praktyczne bioklimatologii w przemyśle kauczukowym. In : Jurkowlaniec R. (ed.), Skorupa A.M. (ed.), Dutkiewicz R. (ed.) Więckowski T. (ed.), Kołacz R. (ed.), Gospodarowicz A. (ed.) *Wroclawskie dni nauki i techniki*. Wrocław : Naczelna Organizacja Techniczna, 2013, p. 26. Wroclawskie Dni Nauki i Techniki, 39, Wrocław (POL), 2013/10/25
38. Nizinski J.J., 2013. *Zastosowania praktyczne bioklimatologii w przemyśle kauczukowym*. Bondy : IRD, 2013, 78 p. multigr. Wroclawskie Dni Nauki i Techniki = Journées Internationales des Sciences et Techniques, 39, Wrocław (POL), 2013/10/24
39. Nizinski J.J., & Montoroï J.-P., 2012. « A quoi sert la bioclimatologie ? », Conférence à l'Académie Polonaise des Sciences à Paris le 23 novembre 2012, Polycopié, IRD, Bondy, 70 pages
40. Nizinski J.J., 2011. « Modélisation des systèmes sol-plante-atmosphère, instrumentation ». In: Mohammed Hachicha, Erik Braudeau & Jean-Pierre Montoroï (éditeurs), Actes du 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 et/ou de précision », INGREF, DG/ACTA, QEERI & IRD, Tunis, Tunisie, pp. 61-70
41. Nizinski J.J., Braudeau E., Lointier M. & Montoroï J.-P., 2011. « 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 et/ou de précision », Polycopié, IRD-Bondy, INGREF-Ariana, Tunis, Tunisie, 100 pages
42. Galat G., Galat-Luong A., Luong T.M. & Nizinski J.J., 2011. « *Le journal intime d'un singe vert face au changement climatique* », Editeur: JePublie (ISBN: 2951053436), Paris, 47 pages
43. Nizinski J.J., 2011. « *Changement climatique: Rapide bilan des connaissances scientifiques* ». Conférence sur les changements climatiques, UMR 211 « BIOEMCO - Interactions biologiques dans les sols », Polycopié, IRD - Université d'Orléans, Orléans-Bondy, 67 pages
44. Richard N., Aubertin C., Boutin D., Chaboche J., Nizinski J.J., Rakoto H., Servain S. & Yengue J.-L., 2011. « *Demande sociale et management de la ressource en eau des golfs du Centre* », In: Hassane Zouhal & José Chaboche (éditeurs), Actes du XIV^{ème} Congrès de l'ACAPS - Association des Chercheurs en Activité Physique et Sportive, du 24 au 26 Octobre 2011, Université Européenne de Bretagne, Rennes, pp. 281-282
45. Nizinski J.J., Galat G. & Galat-Luong A., 2010a. « *Echanges de masse et d'énergie dans les couverts végétaux : cas d'une savane et d'une plantation* », In: Vincent Dubreuil, Olivier Planchon, Hervé Quenol & Valérie Bonnardot (éditeurs), Actes du Colloque, XXIII^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Risques et changement climatique », LETG (UMR 6554 CNRS), Université Européenne de Bretagne, Rennes 2, Rennes, pp. 451-456
46. Nizinski J.J., Galat G. & Galat-Luong A., 2010b. « *Interest using the Bowen-ratio method to study the actual evapotranspiration of the savannah in the climate change context (the Kouilou basin, Congo-Brazzaville)* ». In: Wilfried Endlicher & Fridrich-Wilhelm Gerstengabe (éditeurs), Continents under climate change, Conference on the occasion of the 200th anniversary of Humboldt-Universität zu Berlin. Abstracts of lectures and posters of the conference, April 21-23, 2010, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Berlin, Allemagne, n° 115, pp. 75-76.
47. Nizinski J.J., Galat-Luong A. & Galat G., 2010. « *Climate change and sustainability of Eucalyptus plantations in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville)* ». In : Wilfried Endlicher et Fridrich-Wilhelm Gerstengabe (éditeurs), Continents under climate change. Conference on the occasion of the 200th anniversary of Humboldt-Universität zu Berlin. Abstracts of lectures and posters of the conference, April 21-23, 2010, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Berlin, Allemagne, n° 115, pp. 75-76
48. Galat G., Galat-Luong A. & Nizinski J.J., 2008a. Chimpanzees and baboons face global warming by digging wells to filtrate drinking water. In: Varis O., Tortajada C., Chevallier P., Pouyaud B., Servat E. (éditeurs), *Global changes and*

water resources: confronting the expanding and diversifying pressures, CDROM VERSeau Développement, Montpellier, 13 pages pdf file.

49. Galat G., Galat-Luong A. & Nizinski J.J., 2008b. « *Our cousins' chimpanzees and baboons face global warming digging wells and filtering their drink water* ». In: (Editeurs), Proceedings of XIII^{ème} Congrès Mondial de l'Eau: Changements globaux et ressources en eau, Montpellier, pp. 1-5.
50. Nizinski J.J., Loumeto J.J., Ayoma M.-B., Mabilia-N'goma A. & Nsemi R.N., 2006. « *Durabilité de plantations d'Eucalyptus dans le bassin du Kouilou (Congo)* ». In: Joël Loumeto et Jean de Dieu Nzila (éditeurs), Premières Journées Nationales sur la Recherche Forestière au Congo: Une meilleure connaissance pour une gestion durable de nos forêts », Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo, pp. 1-10
51. Nizinski J.J., Loumeto J.J., Mouvondy W. & Founa-Toutou E.-C., 2006. « *Mesures de l'évapotranspiration réelle d'une savane à l'aide du rapport de Bowen (bassin du Kouilou, Congo)* ». In: Joël Loumeto & Jean de Dieu Nzila (éditeurs), Premières Journées Nationales sur la Recherche Forestière au Congo: Une meilleure connaissance pour une gestion durable de nos forêts », Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo, pp. 11-20
52. Nizinski J.J., 2003. « *Forest bioclimatology and tree-water relations* », In: André Clement-Demange (éditeur), Rubber wood biomass: adaptation of rubber cropping and rubber research in South-East Asia, Kasetsart University-CIRAD, Bangkok, Thaïlande, pp. 1-16
53. Bouillet J.-P., Nzila J.-D., Ranger J., Laclau J.-P. & Nizinski J.J., 1998. « *Sustainability of Eucalyptus plantations in the equatorial zone, on the coast plains of the Congo* », In: Ch. Cossalter, P. Roberts & S.E.K. Nambiar (éditeurs), Site management and productivity in tropical plantations. Impacts on soils and options for management over successive rotations, Institute for Commercial Forestry Research-University of Natal, Pietermaritzburg, Afrique du Sud, pp. 13-21
54. Bouillet J.-P., Nizinski J.J., Nzila J.-D. & Ranger J., 1997. Sustainability of *Eucalyptus* commercial plantations: the Congolese approach, In: Proceedings of IUFRO Conference 4, Salvador, Brazil, 24-29 August 1997, pp. 232-237
55. Nizinski J.J., Morand D. & Fournier Ch., 1995. « *Impact of land clearance on the thorn scrub water balance (North Senegal)* », In: B. Wieszik (éditeur), Hydrological Processes in the Catchment, Cracow University of Technology Press, Cracow, pp. 411-426
56. Grouzis M., Nizinski J.J. & Fournier Ch., 1993. « *Interactions entre arbre et herbe au Sahel: effets sur la composition floristique et sur l'efficience de l'utilisation de l'eau* ». In: A. Riedacker, E. Dreyer, C. Pafadam, H. Joly & G. Bory (éditeurs), Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides, Groupe d'Etude de l'Arbre-Observatoire du Sahara et du Sahel, John Libbey Eurotext, Paris-London-Rome, pp. 131-144
57. Grouzis M., Nizinski J.J. & Akpo E., 1991. « *L'arbre et l'herbe au Sahel: Influence de l'arbre sur la structure spécifique et la production de la strate herbacée, et sur la régénération des espèces ligneuses* ». In: André Gaston, Malcolm Kernick & Henri-Noël Le Houérou (éditeurs), Les Actes du Quatrième Congrès International des Terres de Parcours, vol. 1, Association Française de Pastoralisme, Editions du CIRAD-GERDAT, pp. 207-210
58. Nizinski J.J. & Grouzis M., 1991. Bilan d'eau d'une steppe à *Acacia tortilis* (Forsk.) Hayne ssp. *raddiana* (Savi.) Brenan et *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. (Nord du Sénégal). In: André Gaston, Malcolm Kernick & Henri-Noël Le Houérou (éditeurs), Actes du Quatrième Congrès International des Terres de Parcours, vol. 1, Association Française de Pastoralisme, Editions du CIRAD-GERDAT, pp. 285-288
59. Nizinski J.J. & Morand D., 1991. Eléments d'éco-physiologie. Polycopié, l'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, Pobé, Bénin, 22 pages
60. Pontailier J.-Y., Nizinski J.J. & Saugier B., 1987. Bilan de l'eau et évapotranspiration de forêts feuillues. In: R. Calvet (éditeur), Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère. Publications de l'INRA, Paris, pp. 329-355

Ce dossier contient:

LISTE DES PUBLICATIONS.....	2
1. INTRODUCTION.....	6
2. DOMAINE D'ETUDE DE LA BIOCLIMATOLOGIE.....	7
3. MODELISATION DES SYSTEMES SOL-PLANTE-ATMOSPHERE.....	8
4. MESURE DE L'EVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VEGETAUX DANS LES ZONES ARIDES : PROBLEMES ET SOLUTIONS.....	11
5. BILAN HYDRIQUE COMPARE D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS DANS LE BASSIN DU KOUILOU (REPUBLIQUE POPULAIRE DU CONGO.....	33
6. Etude de la conductivité hydraulique des troncs d'hévéa: cas d'une plantation en Côte d'Ivoire.....	49

1. INTRODUCTION (**DIAPO n° 1**)

Pour l'inauguration va multumesc tuturor in special d'invitatiei Profesoare Zaharia Liliana, pentru aceasta invitatie la seminar.

Voici je vous présente la structure de notre exposé; nous allons discuter (**DIAPO n°2**):

- le domaine d'étude de la bioclimatologie
- la modélisation des systèmes sol-plante-atmosphère
- nous allons commenter trois exemples *de régulation des flux d'eau*, (**DIAPO n°3**) – problèmes de l'échelle spatiale :

A) MESURE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VÉGÉTAUX DANS LES ZONES ARIDES : PROBLÈMES ET SOLUTIONS

B) BILAN HYDRIQUE COMPARÉ D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS DANS LE BASSIN DU KOUILOU (REPUBLIQUE POPULAIRE DU CONGO)

C) ÉTUDE DE LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE DES TRONCS D'HEVEA: CAS D'UNE PLANTATION EN CÔTE D'IVOIRE

2. DOMAINE D'ETUDE DE LA BIOCLIMATOLOGIE (DIAPO n° 3)

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)¹, 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.

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.

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).

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

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).

3. MODELISATION DES SYSTEMES SOL-PLANTE-ATMOSPHERE (DIAPO n° 4)

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 (de Parcevaux & Huber, 2007²).

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.

² De Parcevaux S. & Huber L., 2007. Bioclimatologie: concept et applications. Editions Quae, INRA, Versailles, 336 pages

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 ou à la transpiration, et les seconds des modèles analogiques, comme utilisation de circuits électriques pour rendre compte de la diffusion (par exemple le flux d'eau dans le système sol-plante-atmosphère) 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 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** (...*Enchaînement de cause à effet entre les phénomènes physiques...*) ou **stochastiques** (...*Se dit de phénomènes ou de processus dont l'évolution s'étudie au moyen de probabilité...*)

- 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.

4. MESURE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VÉGÉTAUX DANS LES ZONES ARIDES : PROBLÈMES ET SOLUTIONS (Nizinski et al. 2014³)

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.

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

Summary. -Measures of evapotranspiration of plant covers in arid zones: difficulties and solutions. 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.

³ Nizinski J.J., Montoroi J.-P. et Lointier M., 2014. Echanges de masse et d'énergie dans les couverts végétaux: cas d'une savane et d'une plantation. Sécheresse-Changements globaux (sous presse)

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

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:

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

Avec: E_p -évapotranspiration potentielle, en mm jour⁻¹; Δ -dérivée de la fonction reliant la pression de vapeur d'eau saturante de l'air et la température de l'air, en kPa °C⁻¹ ($\Delta = e_{s(t)} - e_{s(t_h)} / t - t_h$); avec: $e_{s(t)}$ -pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface t, en kPa; $e_{s(t_h)}$ -pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface humide t_h , 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⁻²;

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

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-réflexivité de la surface (fraction du rayonnement réfléchi pour une longueur spécifique); H-flux de chaleur sensible, en W m⁻²; λE -flux de chaleur latente d'évaporation, en W m⁻²; G_s -flux de chaleur dans le sol, en W m⁻²; λ -chaleur latente de vaporisation, en J kg⁻¹ (2451,8 J g⁻¹); γ -constante psychrométrique, en kPa °C⁻¹

$$\gamma = c_p P / \lambda (M_{EAU} / M_{AIR}) \quad [4]$$

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;

$$E_a = 2,6 (e_{s(t)} - e_{a(t)}) (1 + 0,537 u_{2M}) \quad [5]$$

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):

$$E_a = \frac{E_p}{\left(1 + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma}\right) \cdot \left(\frac{r_{st}}{LAI \cdot r_a}\right)\right)} \quad [6]$$

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.

MATERIELS, METHODES ET REALISATION DE MESURES

L'application de l'équation de Penman-Monteith suppose la connaissance des résistances de couche limite, aérodynamique et du couvert, ainsi que du déficit de saturation de l'air. La mesure de ces variables pose un nombre important de problèmes que nous avons tenté de résoudre.

LA RESISTANCE DE COUCHE LIMITE

L'équation de Penman-Monteith 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 (Figure n°1).

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 (Saugier, 1996):

$$r_a = \frac{r_b}{LAI} + r_a(1) \quad [7]$$

et

$$r_c = \frac{r_b + r_{st}}{LAI} + r_a(1) \quad [8]$$

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 (voir l'analyse détaillée dans Saugier, 1996); 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):

$$r_a = \left(\frac{1}{(k^2 \cdot u_{2m})} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2 \quad [9]$$

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, Photo n°1; et savane du littoral congolais, Photo n° 2), 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, Photo n°3) nous avons calculé g_a à partir de la hauteur du peuplement:

$$d=0,75 h \text{ et } z_0=0,1 h \quad [10] \text{ et } [11]$$

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*) (Photo n°1) (Nizinski, 2007).

Les valeurs maximales de l'interception des bosquets de *Balanites aegyptiaca* et d'*Acacia raddiana* sont de 8,4 et 12,4 % des précipitations incidentes alors qu'elles peuvent atteindre 40 % des précipitations incidentes (P_i) pour le chêne en zone tempérée (forêt de Fontainebleau); les valeurs maximales de l'interception des bosquets (8,4 et 12,4 % P_i) sont du même ordre de grandeur que celle des zones herbacées de la savane sahélienne (7,5 % de P_i) (Photo n°1) et de la savane du littoral congolais (7 % de P_i) (Photo n°2).

LA RESISTANCE DU COUVERT

A. LA RESISTANCE STOMATIQUE

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 nous avons 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^{er} cas de figure à l'exception de *Balanites aegyptiaca*. Lors d'une période de dessèchement du sol *Balanites aegyptiaca* a une stratégie de modification de l'indice foliaire (chute des feuilles) associée au maintien d'un potentiel hydrique foliaire élevé pour les feuilles restantes (pendant une période dépendante de la période de sécheresse). Parmi les régulations d'une plante soumise à la sécheresse, il y a celles relatives au flux d'eau dans la plante et celles relatives à la distribution des assimilats, en général une part plus importante du carbone est destinée aux racines et/ou il y a réduction de la croissance foliaire et accélération de la sénescence.

La résistance stomatique est généralement systématiquement mesurée sur le terrain – ce que 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.

B. LA RESISTANCE STOMATIQUE MINIMALE

La résistance stomatique dépend de la **résistance stomatique minimale**, valeur de résistance minimale 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) (Photo n°3), 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 (Figure n°2). La période (LAI_{max} – valeurs minimale de r_{st-min}: chez *Quercus petraea* - LAI=100 %; r_{st-min}=3,6±0,9 s cm⁻¹; LAI=8 %; r_{st-min}=8,7±3,6 s cm⁻¹) (Photo n°4abcd;

Nizinski, 2007) 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).

C. ESTIMATION DE LA RESISTANCE DU COUVERT

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.

LE DEFICIT DE SATURATION DE L'AIR

Une variable difficile à estimer dans l'équation Penman-Monteith est 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).

Méthodologiquement, il faut éviter tout effet de « fetch » pour que les formules aérodynamiques classiques puissent y être appliquées (Perrier, 1976). La « couche limite de surface » de la savane congolaise est alors $Z_H \approx [3,0 \times (\text{hauteur du peuplement})]$ dans le cas du flux de chaleur sensible, et $Z_{\lambda E} \approx [3,5 \times (\text{hauteur du peuplement})]$ dans le cas du flux de chaleur latente.

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 (épaisseur de quelques dizaines de mètres la nuit et jusqu'à 3000 mètres le jour).

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

INCIDENCE D'UNE MODIFICATION DU COUVERT SUR L'ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE

L'homme a modifié et continue de modifier les couverts végétaux; globalement il y a une 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 tenant 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 $2,5 \text{ cm s}^{-1}$ à $5,0 \text{ cm s}^{-1}$ pour « l'herbacé » et de $5,0 \text{ cm s}^{-1}$ à $10,0 \text{ cm s}^{-1}$ pour le « forestier »). Les deux couverts se différencient par leur albédo (supérieure pour l'écosystème herbacé) et leur bilan énergétique (inférieur pour l'écosystème herbacé), l'évapotranspiration réelle d'un écosystème herbacé dépendra surtout du rayonnement net et l'évapotranspiration réelle d'une forêt du déficit de saturation de l'air.

INCIDENCE DE L'ÉTAT DU SOL

Le sol joue un rôle d'importance majeure: l'état de surface du sol va contrôler l'existence (ou l'absence) de ruissellement dû à la présence (ou à l'absence) d'une croûte dans des écosystèmes herbacés à faible recouvrement. Dans la steppe à *Acacia raddiana*, la 1^e année, après la mise en 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^e année un sarclage 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.

INCIDENCE DE LA CIRCULATION GENERALE DE L'ATMOSPHERE ET ECHELLE DES PHENOMENES

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.

L'EXEMPLE DES FORETS CADUCIFOLIEES TEMPEREES

Le rapport Transpiration/Evapotranspiration potentielle augmente avec l'augmentation de l'indice foliaire suivant une fonction $1 - e^{-k LAI}$ 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 sahéenne, 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 $LAI=LAI_{max}$, 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 caducifoliées; comme il existe un décalage entre le moment où $LAI=LAI_{max}$ et le moment où r_{st-min} atteint sa valeur minimale, l'évapotranspiration réelle atteint son maximum (en période de non contrainte hydrique) après $LAI=LAI_{max}$ au moment où r_{st-min} est à sa valeur minimale pour le chêne environ un mois après que $LAI=LAI_{max}$.

L'ADAPTATION A LA SECHERESSE DANS LES ZONES ARIDES

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 profonds (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^e) 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^e) 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.

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*. (2nd ed.), Edward Arnold, London.

MONTOROI, J.-P., NIZINSKI, J.J., LOINTIER, M. & SILVERA N., (2012). - French-Egyptian project "Sustainable Management of Adverse Impacts on Farming and Soil Ecosystem Associated with Long Term Use of Low Quality Irrigation Water", Progress Report, IRD-AIRD Agence, STDF, Cairo, 39 pages.

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. & 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

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.

FIGURES ET PHOTOS

Figure 1 – Modèle représentant schématiquement la résistance d'un couvert végétal donné (r_c). Les niveaux de résistance sont représentés par des segments en dents de scie. Dans le modèle « Big leaf » (Monteith, 1965); la résistance du couvert végétal (r_c) se réfère à une couche de végétation

Model schematically showing the resistance of given vegetation cover (r_c). Resistance levels are represented by serrated segments. In the "Big leaf" model (Monteith, 1965); the resistance of the vegetation cover (r_c) refers to one vegetation layer

Figure 2 - Evolution de la résistance stomatique minimale (r_{st-min} en $s\ cm^{-1}$) avec le potentiel hydrique foliaire (Ψ_m , en bar) pour des feuilles de chêne lors de la saison de croissance 1983 en forêt de Fontainebleau et dans le Parc de l'Université d'Orsay de 1987 ($r_{st-min}=78,501\ SF^{0,7505}$; $r^2=0,905$; $N=12$) (Nizinski & Saugier, 1989)

Evolution of the minimal stomatal resistance (r_{st-min} , $s\ cm^{-1}$) with the leaf water potential (Ψ_m , bars) for an oak leaves during the growing season of 1983 in the forest of Fontainebleau and in the Park of University Orsay of 1987 ($r_{st-min}=78.501\ SF^{0.7505}$; $r^2=0.905$; $N=12$) (Nizinski & Saugier, 1989)

Figure 3 – Evolution de la résistance stomatique minimale (r_{st-min} en $s\ cm^{-1}$) avec la surface foliaire (SF, en %) pour des feuilles de chêne lors de la saison de croissance 1983 en forêt de Fontainebleau

Evolution of the minimal stomatal resistance (r_{st-min} , $s\ cm^{-1}$) with the leaf area (SF, %) for an oak leaves during the growing season of 1983 in the forest of Fontainebleau

Photo 1 – Site expérimental situé dans la région du Ferlo (nord du Sénégal). Paysage de steppe très ouverte à épineux, comprenant une strate herbacée composée d'espèces annuelles avec une dominance de graminées (rendement en matière sèche moyenne de $2895\ kg\ ha^{-1}\ an^{-1}$) et parsemée d'arbres et d'arbustes (*Acacia tortilis* et *Balanites aegyptiaca*) avec une hauteur moyenne de 6,5 m, une densité de $151\ arbres\ ha^{-1}$ et une surface terrière de $3,87\ m^2\ ha^{-1}$) (Nizinski et al. 1994).

*Experimental site located in the Ferlo region (northern Senegal). Landscape formed by a very open thorny steppe including a herbaceous layer composed of annual species with a dominance of grasses (average dry matter yield of $2895\ kg\ ha^{-1}\ year^{-1}$) and dotted with trees and shrubs (*Acacia tortilis* and *Balanites aegyptiaca*) with an average height of 6.5 m, a density of $151\ trees\ ha^{-1}$ and a total basal area of $3.87\ m^2\ ha^{-1}$) (Nizinski et al. 1994)*

Photo 2 - Site expérimental situé dans le bassin du Kouilou sur la côte atlantique du Congo (vue depuis le site d'étude). Paysage de savane dominé à 90% par *Lutetia arundinacea* (hauteur moyenne de 1,5 m; biomasse maximale de $3,5\ tonnes\ ha^{-1}$; biomasse morte maximale de $4,6\ tonnes\ ha^{-1}$; indice de surface foliaire de 4,3; zone racinaire de 3 m de profondeur; capacité au champ (R_{CC}) de 363 mm; point de flétrissement permanent (R_{PFP}) de 181 mm et réserve utile (R_{RU}) de 182 mm (Nizinski et al. 2009)

*Experimental site located in the watershed of Kouilou on the Atlantic coast of Congo (view from the study site). Landscape of a savanna 90% dominated by *Lutetia arundinacea* (average height of 1.5 m, maximum biomass of $3.5\ tons\ ha^{-1}$, maximum dead biomass of $4.6\ tons\ ha^{-1}$, leaf area index of 4.3, root zone of 3 m in depth, field capacity (R_{FC}) of 363 mm,*

permanent wilting point (R_{WP}) of 182 mm and available water content (R_{AW}) of 181 mm) (Nizinski et al, 2009)

Photo 3 - Site expérimental situé dans le bassin du Kouilou sur la côte atlantique du Congo (vue depuis le site d'étude). Paysage de forêt à Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna* plantés en janvier 1992 avec des plantules issues de boutures et ayant environ 0,3 m de hauteur). La plantation d'Eucalyptus a cinq ans d'âge. Les arbres sont plantés selon des rangs orientés sud-ouest avec un écartement de 4,0 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 au niveau du sol de 53,4 cm; densité de 502 arbres ha^{-1} ; surface terrière de 11,0 $m^2 ha^{-1}$; indice de surface foliaire de 3,2; volume de bois de 118,5 $m^3 ha^{-1}$; zone racinaire de 5 m de profondeur; capacité au champ (R_{CC}) de 617,6 mm; point de flétrissement permanent (R_{PFP}) de 309,2 mm et réserve utile (R_{RU}) de 308,4 mm (Nizinski et al. 2011).

*Experimental site located in the watershed of Kouilou on the Atlantic coast of Congo (view from the study site). Landscape formed by a forest of Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* and *Eucalyptus 12ABL*saligna* planted in January 1992 with seedlings grown from cuttings and having a height of about 0.3 m). The age of the Eucalyptus plantation is five years old. The trees are planted in rows facing southwest with a spacing of 4.0 m between two individuals of the same line and a distance of 4.7 m between two lines (average height of 24.2 m, mean stem circumference at soil level of 53.4 cm, density of 502 trees ha^{-1} , basal area of 11.0 $m^2 ha^{-1}$, leaf area index of 3.2, timber volume of 118.5 $m^3 ha^{-1}$, root zone of 5 m in depth, field capacity (R_{FC}) of 617.6 mm, permanent wilting point, (R_{WP}) of 309.2 mm and available water content (R_{AW}) of 308.4 mm) (Nizinski et al. 2011)*

Photo 4abcd – Images par microscopie électronique à balayage montrant deux stades morphologiques des stomates et trichomes sur des feuilles de *Quercus petrea* poussant dans le Parc de l'Université d'Orsay (Nizinski, 2007): (a) basse résolution et (b) haute résolution pour le stade morphologique du 24 April 1987 ($SF = 8\%$ of SF_{max} , $r_{st-min} = 8.7 \pm 3.6 s cm^{-1}$, $N = 50$). (c) basse résolution et (d) haute résolution pour le stade morphologique du 14 May 1987 ($SF = 100\%$ of SF_{max} , $r_{st-min} = 3.6 \pm 0.9 s cm^{-1}$, $N = 50$). L'emplacement de certains stomates (st) et trichomes (tr) est mentionné sur la photo 4b.

*Images by scanning electron microscopy showing two morphological stages of stomata and trichomes on leaves of *Quercus petrea* growing in the Park of the Orsay University (Nizinski, 2007): - (a) low resolution and (b) high resolution for the 24 April 1987 morphological stage ($SF = 8\%$ of SF_{max} , $r_{st-min} = 8.7 \pm 3.6 s cm^{-1}$, $N = 50$). - (c) low resolution and (d) high resolution for the 14 May 1987 morphological stage ($SF = 100\%$ of SF_{max} , $r_{st-min} = 3.6 \pm 0.9 s cm^{-1}$, $N = 50$). The location of some stomatas (st) and trichomes (tr) is mentioned on photo 4b.*

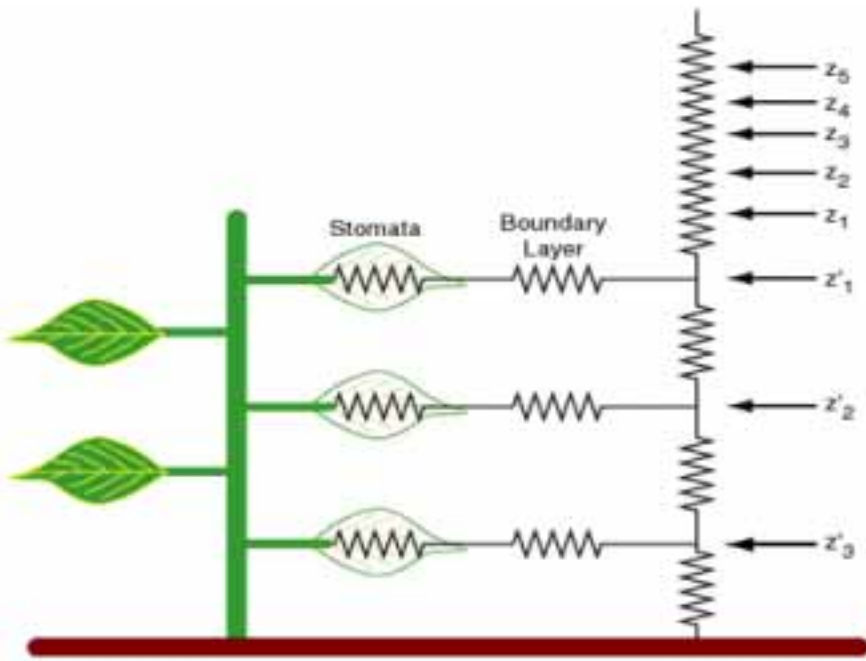


Figure 1

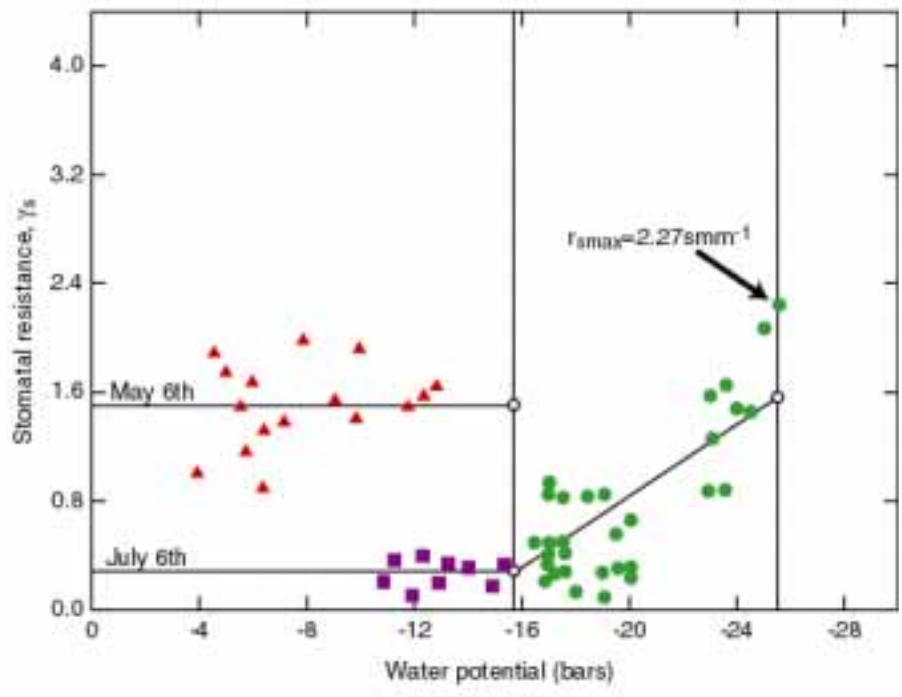


Figure 2

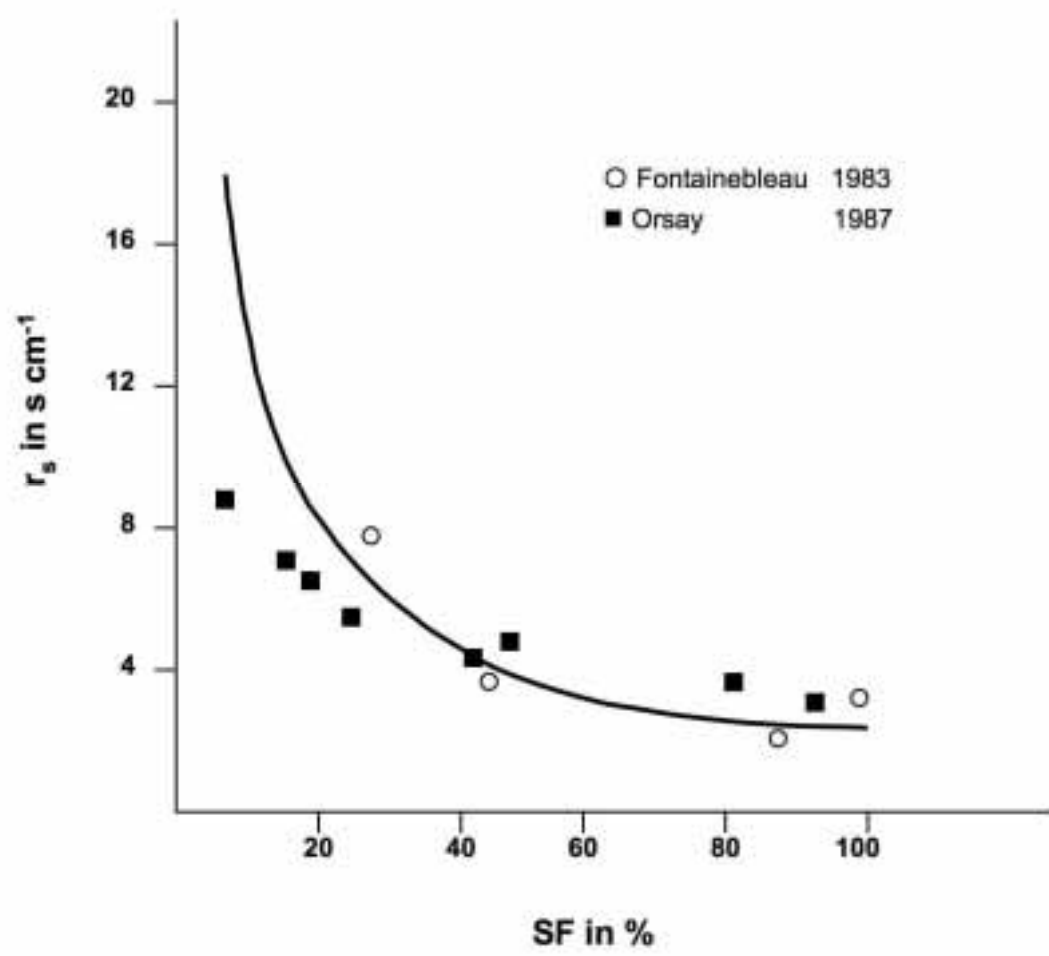


Figure 3



Photo 1



Photo 2



Photo 3

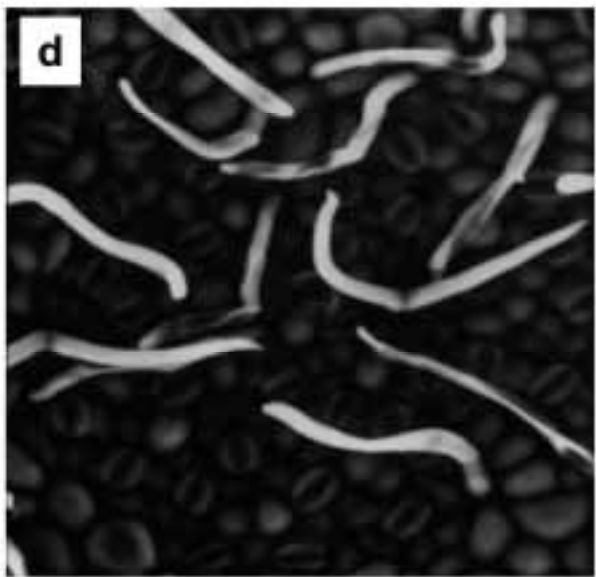
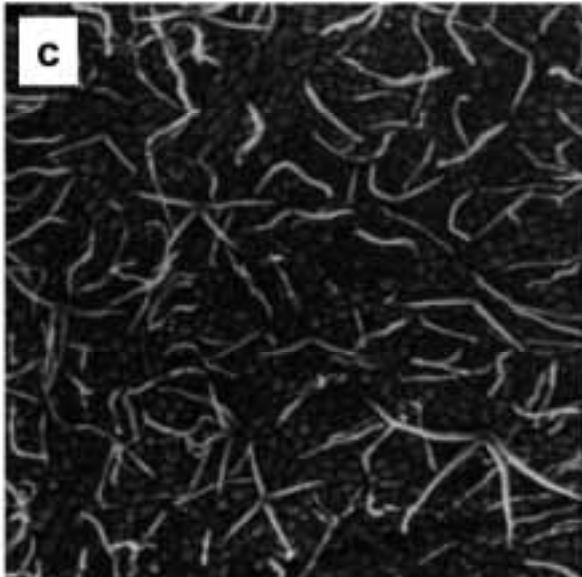
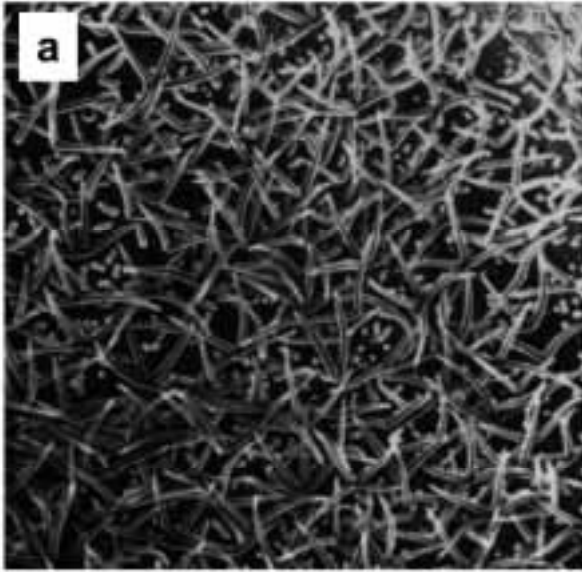


Photo 4

5. BILAN HYDRIQUE COMPARE D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS DANS LE BASSIN DU KOUILOU (REPUBLIQUE POPULAIRE DU CONGO) (Nizinski et al. 2008⁴)

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⁻¹, une surface terrière de 11,0 m² ha⁻¹, un indice foliaire de 3,2 et un volume de bois de 118,5 m³ ha⁻¹. 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.

⁴ 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

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 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 1 : Localisation de la zone d'étude: région du Kouilou, sur la façade atlantique de la République du Congo (surface de 13 315 km², 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 $P_{i49-98}=1188,4$ mm, une évapotranspiration potentielle (Penman) de 1390,4 mm.an⁻¹ ($ETP_{92-98}=3,8$ mm jour⁻¹; $ETP_{PLUIES}=4,2$ mm jour⁻¹, $ETP_{SÈCHE}=3,2$ mm jour⁻¹), 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^{-1} ; ETR - évapotranspiration réelle du peuplement, en mm jour^{-1} ; D - drainage, en mm jour^{-1} ; ΔR - variation de la réserve en eau du sol, en mm ; Δt - pas de temps des calculs, en jours; T - transpiration, en mm jour^{-1} ; I_n - interception nette, en mm jour^{-1} ; E_s , évaporation du sol, en mm jour^{-1} ; P_s - précipitations au sol, en mm jour^{-1} ; E_c - écoulement le long des troncs pour la plantation, en mm jour^{-1} .

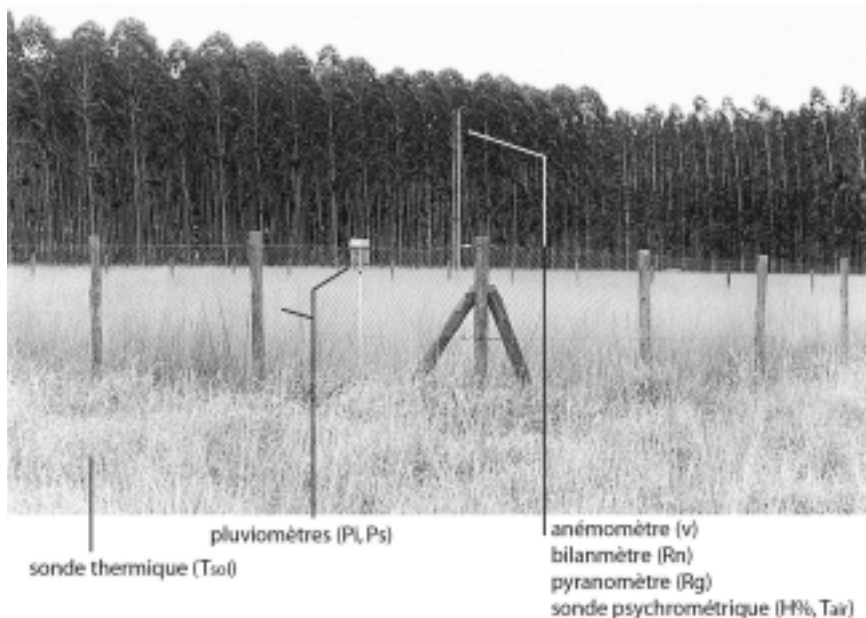


Photo 1 : Vue de la station d'étude n°1: une savane dominée à 90% par *Lutetia arundinacea* (hauteur moyenne de 1,5 m; biomasse maximale de 3,5 tonnes ha^{-1} et masse morte maximale de 4,6 tonnes ha^{-1} , indice foliaire de 4,3; zone racinaire de 3 m ; capacité au champ $R_{CC}=363$ mm; point de flétrissement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

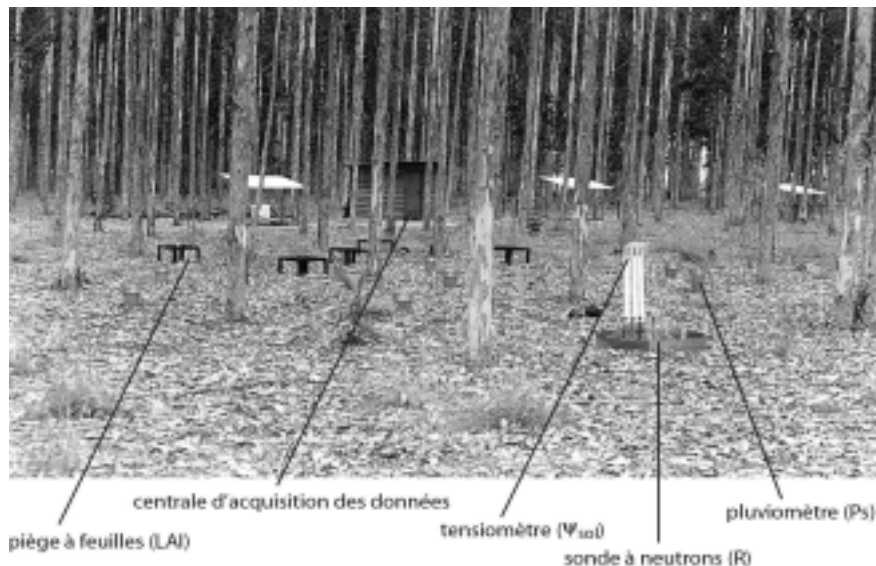


Photo 2 : Vue de la station d'étude n°2: une futaie d'Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna* plantés en janvier 1992 à l'état de plantules issues de boutures, plantules d'environ 0,3 m de hauteur) de cinq ans plantés selon des rangs orientés sud-ouest avec un écartement de 4 m entre 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⁻¹; surface terrière de 11,0 m² ha⁻¹; indice foliaire de 3,2; volume de bois de 118,5 m³ ha⁻¹; zone racinaire de 5 m; capacité au champ R_{CC}=617,6 mm; point de flétrissement permanent R_{FPF}=309,2 mm; réserve utile R_{RU}=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_c) 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_{CC}) 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 :

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

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

Avec: ETP - évapotranspiration potentielle en mm jour⁻¹.

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 m²).

$$ETP = (\Delta R_n / \lambda + \gamma E_a) / (\Delta + \gamma) \quad [6]$$

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

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

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 ± 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°49'S, longitude 11°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.

fréquence	type de mesure	matériel
hebdomadaire	précipitations incidentes précipitations au sol écoulement le long des troncs réserve en eau du sol	pluviomètre pluviomètres gouttières sonde à neutrons tarière sonde TDR
journalière	température moyenne de l'air humidité relative de l'air pression actuelle de vapeur d'eau dans l'air pression atmosphérique durée d'insolation vitesse du vent	station météorologique
<small>Ces mesures en continu sont réalisées sur une centrale d'acquisition de données de type Micrologger 21XX (Campbell)</small>	pas de temps 1 heure flux de sève potentiel foliaire transpiration foliaire résistance stomatique potentiel hydrique du sol	thermocouples chambre à pression PMS poromètre AP4, Delta-T-Devices poromètre AP4, Delta-T-Devices tensiomètres
	pas de temps 20 minutes humidité relative de l'air température moyenne de l'air vitesse du vent rayonnement global rayonnement net température moyenne du sol	sonde " Vaisala " } sonde " Vaisala " } anémomètre " A100-Vector " } pyranomètre Licor } bilanmètre REBS/Q-7, Campbell } sonde 107, Campbell } <small>mesures à : 2 m et 5 m 6 m 0,05 m et 0,15 m</small>

Tableau 1 : Acquisition des données, type et fréquence des mesures et caractéristiques de matériel.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. CLIMAT LOCAL ET TYPE DE COUVERT

Les résultats concernent la période allant du 17 février 1997 au 26 juillet 1999. Nous nous servons de la classification de Vennetier (1968) qui décompose l'année pluviométrique en saison des pluies de novembre à avril (ici 1996-97, 1997-98 et 1998-99), saison sèche de juin à septembre (ici 1997 et 1998) ; les mois de mai et octobre sont considérés comme des mois de transition. Les précipitations incidentes annuelles (P_i) et l'évapotranspiration potentielle annuelle (ETP) ont été respectivement en 1996 de 1149,8 et 1352,8 mm an^{-1} ; pour 1997, de 1231,3 et 1356,7 mm an^{-1} ; pour 1998, de 1273,8 et 1389,5 mm an^{-1} . Ces trois années sont très proches des moyennes annuelles de P_i et de ETP établies de 1949 à 1998 pour P_i et de 1992 à 1998 pour ETP, respectivement P_{i49-98} de 1188,4 mm an^{-1} et ETP_{92-98} de 1390,4 mm an^{-1} (tableau 2).

Nous avons ensuite comparé les précipitations incidentes à la moyenne calculée sur 49 ans ($P_{i49-98}=1034,3 \text{ mm}$): la saison des pluies 1996-97 est déficitaire par rapport à la moyenne ($P_{i96-97}=459 \text{ mm}$, soit 44 % de P_{i49-98}) ; les précipitations de la saison des pluies 1997-98 ($P_{i97-98}=1338 \text{ mm}$, soit 129 % de P_{i49-98}) et de celle de 1998-99 ($P_{i98-99}=1140 \text{ mm}$, soit 110% de P_{i49-98}) sont supérieures à la moyenne. L'ETP est proche de la moyenne 1992-98 ($ETP_{92-98}=1390 \text{ mm an}^{-1}$) sur toute l'étude soit, pour 1996, 1353 mm an^{-1} (97% de ETP_{92-98}), pour 1997, 1357 mm an^{-1} (98% de ETP_{92-98}), pour 1998, 1389 mm an^{-1} (99% de ETP_{92-98}).

	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	
	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane	Eucalyptus	Savane
Rayonnement net (Rn) W m ⁻²	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
Évapotranspiration potentielle (ETP) mm mm jour ⁻¹	780,5 4,3	717,2 4,0	851,5 4,7	779,2 4,3	856,7 4,7	785,0 4,3	829,6 4,6	760,5 4,2	373,9 3,1	347,8 2,9	402,4 3,3	3,1	388,2 3,2	361,2 3,0
Précipitations incidentes (Pi) mm mm jour ⁻¹	459,3 2,5	459,3 2,5	1338,5 7,4	1338,5 7,4	1139,9 6,3	1139,9 6,3	979,2 5,4	979,2 5,4	15,5 0,1	15,5 0,1	63,5 0,5	63,5 0,5	39,5 0,3	39,5 0,3
Précipitations au sol (Ps) mm mm jour ⁻¹ % de Pi	412,3 2,3 89,8	422,5 2,3 92,0	1198,0 6,6 89,5	1206,3 6,7 90,1	991,0 5,5 86,9	1005,5 5,6 88,2	867,1 4,8 88,7	878,1 4,9 90,1	9,8 0,1 63,1	13,4 0,1 86,6	39,9 0,3 62,9	47,1 0,4 74,2	24,8 0,2 63,0	30,3 0,2 80,4
Écoulement le long des troncs (Ec) mm mm jour ⁻¹ % de Pi	9,2 0,1 2,0	26,8 0,1 2,0	22,8 0,1 2,0	22,8 0,1 2,0	19,6 0,1 2,0	19,6 0,1 2,0	0,3 0,1 2,0	0,3 0,1 2,0	0,3 0,0 2,0	1,3 0,0 2,0	0,8 0,0 2,0	0,8 0,0 2,0	0,8 0,0 2,0	0,8 0,0 2,0
Interception nette (In) mm mm jour ⁻¹ % de Pi	47,0 0,3 10,2	36,8 0,2 8,0	140,5 0,8 10,5	132,2 0,7 9,9	148,9 0,8 13,1	134,4 0,7 11,8	112,1 0,6 11,3	101,1 0,6 9,9	5,7 0,0 36,9	2,1 0,0 13,4	23,6 0,2 37,1	16,4 0,1 25,8	14,7 0,1 37,0	9,2 0,1 19,6
Transpiration (T) mm mm jour ⁻¹	693,2 3,8	436,2 2,4	707,8 3,9	584,6 3,2	564,7 3,1	412,7 2,3	655,2 3,6	477,8 2,6	93,9 0,8	112,2 0,9	242,8 2,0	112,2 0,9	166,4 1,4	112,2 0,9
Évapotranspiration (ETR) mm mm jour ⁻¹	740,2 4,1	473,0 2,6	848,3 4,7	716,9 4,0	713,6 3,9	547,1 3,0	767,4 4,2	579,0 3,2	99,7 0,8	114,3 0,9	266,4 2,2	128,6 1,1	183,0 1,5	121,5 1,0
Drainage (D) D = Ps+Ec-ETR mm R _{0,02} mm R _{0,11} mm dR = R _{0,02} - R _{0,11} mm D = Ps+Ec-ETR-dR mm mm jour ⁻¹	0,0 377,6 361,1 16,5 0,0 0,0	0,0 360,9 222,3 138,5 0,0 0,0	376,4 508,1 338,7 169,4 207,1 1,1	488,4 337,8 238,1 99,7 389,7 2,2	300,2 462,8 425,8 37,0 263,2 1,5	458,4 347,0 326,2 20,8 437,6 2,4	225,6 315,9 156,8 0,9	315,9 275,8 275,8 1,5	0,0 345,3 311,8 33,5 0,0	0,0 206,6 230,2 68,5 0,0	0,0 494,8 380,3 104,5 0,0	0,0 297,8 344,1 -46,3 0,0	0,0 183,0 380,3 -46,3 0,0	0,0 121,5 380,3 -46,3 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 *Lutetia arundinacea*, présence de *Elyonrus brazzae*, *Ctenium newtonii*, *Rhynchelytrum nerviglume*, *Lutetia simplex*, *Probelaniceps*, *Erosemia 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 (λE - 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 $a_{\text{EUCALPTUS}}=0,13$ et $a_{\text{SAVANE}}=0,25$) sont issues de la bibliographie de Pinker *et al.* 1980. Ces valeurs ont été vérifiées par des mesures *in situ* en septembre 1998 ($a_{\text{EUCALPTUS}}=0,12$ et $a_{\text{SAVANE}}=0,23$; 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} ($3,8 \text{ mm jour}^{-1}$ 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 ($\text{ETP}_{68-71}=1420 \text{ mm an}^{-1}$). 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 $4,2 \text{ mm jour}^{-1}$) 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 ($P_i=1670 \text{ mm an}^{-1}$) 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 ($P_i=1280 \text{ mm an}^{-1}$) pour lequel $I_n=12\%$ de P_i , ainsi que Smith (1974) concernant un peuplement d'*Eucalyptus regnans* en Australie ($P_i=810 \text{ mm an}^{-1}$) 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⁻¹ selon Dye (1987) et des minima de 1 à 3 mm jour⁻¹ 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⁻¹ en saison des pluies et de 16,7 m s⁻¹ en saison sèche. Nos valeurs de résistance stomatique minimale en saison des pluies recourent 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⁻¹ pour un indice foliaire de 3,5. La résistance stomatique minimale moyenne de la savane est respectivement de 3,5 m s⁻¹ en saison des pluies et de 5,4 m s⁻¹ 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_{CC}), 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_{CC}, soit 328 mm).

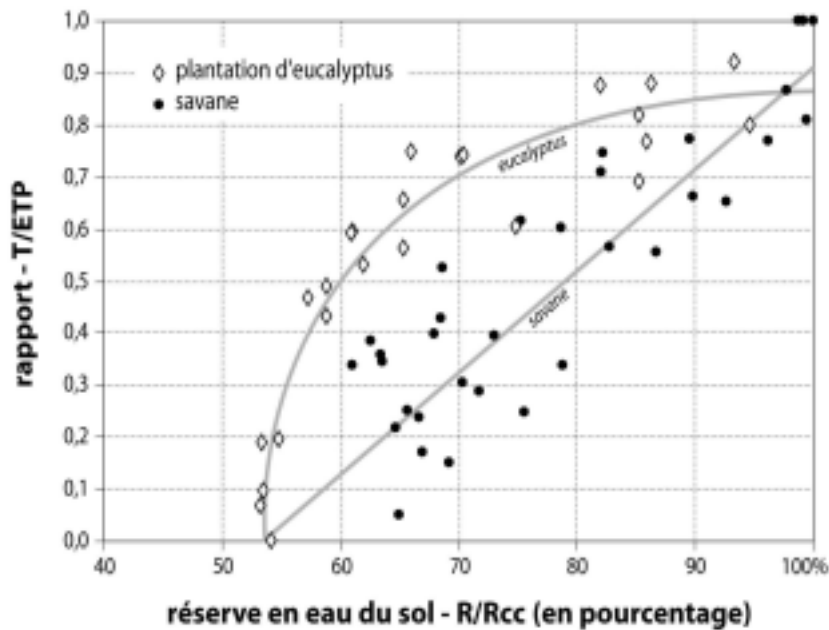


Figure 2 : Relation entre la transpiration relative du peuplement transpiration/évapotranspiration potentielle, T/ETP) et la réserve en eau du sol (valeurs moyennes mensuelles du 17 février 1997 au 26 juillet 1999: (a) plantation d'Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*); (b) savane 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*, $P_i=1670 \text{ mm an}^{-1}$). Calder (1986) a étudié des peuplements d'*Eucalyptus saligna* âgés de 6 ans, au Brésil ($P_i=1280 \text{ mm an}^{-1}$) 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 $R_{CC}=363 \text{ mm}$) 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 RPF), 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 $4,2 \text{ mm jour}^{-1}$. Dye (1987) donne une valeur d'ETR de $4,7 \text{ mm jour}^{-1}$, 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 ($P_i=1250 \text{ mm an}^{-1}$, peuplement âgé de 6 ans, hauteur de 21,9 m, 725 arbres ha^{-1} , LAI=4,23). Pendant les mêmes périodes, la savane a évapotranspiré 579 mm d'eau, soit une moyenne

journalière de $3,2 \text{ mm jour}^{-1}$. 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^{-1}).

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 $10\,000 \text{ m}^2$. 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 $P_i=1100 \text{ mm an}^{-1}$), 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 $T=0,8 \text{ mm jour}^{-1}$, $ETP=3,1 \text{ mm jour}^{-1}$ 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^{-1}) : 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 P_i 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 (P_i) sont inférieures à l'évapotranspiration réelle moyenne annuelle, sont calculées sur les trois années étudiées (respectivement $ETR_{96-99}=1127 \text{ mm an}^{-1}$ pour la plantation et $ETR_{96-99}=821 \text{ mm an}^{-1}$ 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 ($P_{96-97}=459 \text{ mm}$, soit 44% de P_{50-98}) 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 ($P_{96-97}=459 \text{ mm}$), 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_{RU} , 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⁻¹), 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⁻¹ 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 inter-annuelle des

précipitations incidentes importante (de $P_{i58}=296,0$ mm an⁻¹ à $P_{i60}=2045,3$ mm an⁻¹). 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⁻¹ à ajouter au flux de sève (mesuré à 1,30 m du sol) qui s'élève à 0,5 mm jour⁻¹ (valeur moyenne du 24 mai au 1 août 1997). Il est alors possible d'estimer une transpiration journalière d'environ 1 mm jour⁻¹. Pour une ETP proche de 2 mm jour⁻¹ (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. et 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. et 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. et 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. et 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., BOULLET J.P. et 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. et 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. et 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. et 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. et 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. et 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. et 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. et 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

6. ETUDE DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DES TRONCS D'HEVEA : CAS D'UNE PLANTATION EN COTE D'IVOIRE (Nizinski et al. 2008⁵)

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

Study of the stem's xylem conductance of the rubber tree in Côte d'Ivoire plantations

Abstract

The necrosis of the rubber tree is an affection of the stem, being expressed by a deterioration of the cortical tissues on the level of which are located the conducting latex tissues.

⁵ Nizinski J.J., Galat G. & Galat-Luong A., 2012a. Etude de la conductivité hydraulique des troncs d'hévéa: cas d'une plantation en Côte d'Ivoire. (I) Matériel et Méthodes. *An International Journal of Technical Geography*, vol. 13, n°1, 61-71; 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. (II) Résultats et Discussion. *An International Journal of Technical Geography*, vol. 13, n°2, 59-67

We studied the water relations in a mature rubber tree plantation (clone PB 260; planted in January 1996), in Côte d'Ivoire (May and September 2004), on «healthy» and on «necrosed» trees: mean height 15.0 m; mean circumference at 1.3 m level 59.6 cm; stand density 333 trees ha⁻¹; leaf area index 3.2; rooting depths 4 m; field capacity, R_{FC}=412 mm; permanent wilting point, R_{WP}=225 mm; available water content, R_{AW}=187 mm.

Measurements of water potential allow us to appreciate resistances along the continuum roots - trunk - leaves: the resistances between the trunk and the leaves are identical for « healthy » trees ($0.3 \pm 0.1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$) and « necrosed » trees ($0.2 \pm 0.1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$); on the other hand, concerning the resistances between the roots and the trunk the two types of trees differentiate radically: $0.2 \pm 0.1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$ for « healthy » trees and $1.1 \pm 0.3 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$ for « necrosed » trees, it is thus on the level of the junction of grafting that resistance is exceptionally high for « necrosed » trees.

The results seem to show a difference in functioning between «healthy» and « necrosed » trees in the regulation of transpiration flux. Measurements were made here in optimum conditions for water availability; these measurements would have to be continued in conditions of water shortage for the plant, we could then provide more contrasting results.

Keywords: *Hevea brasiliensis*; clone PB 260; Côte d'Ivoire; bark necrosis; transpiration; hydraulic conductance of a stem.

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).

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 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). 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^e 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^{ème} 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.

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).

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 $0,5 \text{ cm}^3 \text{ dm}^{-3}$. 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_p) et l'évapotranspiration réelle du couvert (E_a). 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 : $r_{s(moy)}$ - résistance stomatique moyenne d'une feuille (valeurs mesurées), en $s\ cm^{-1}$; LAI_{P20} - indice foliaire du couvert (valeurs mesurées); $LAI=3,24$; r_a - résistance aérodynamique du couvert, en $s\ cm^{-1}$ (Monteith, 1965):

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

Avec: r_a - résistance aérodynamique, en $s\ cm^{-1}$; k - constante de von Karman (0,39); u_{2M} - vitesse du vent mesurée à 2 mètres de la surface du sol, en $m\ s^{-1}$; z - niveau considéré, en m; z_0 - longueur de rugosité, en m; d - hauteur du déplacement, en m (Thom, 1972).

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

Avec : h - hauteur du peuplement, en m

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

Avec

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

et

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

Avec: $Tr_{(i)}$ - transpiration d'individu (i) au sein d'une placette P20, $mm\ jour^{-1}$; $r_{s(moy)(i)}$ - résistance stomatique moyenne d'une feuille d'individu (i), en $s\ cm^{-1}$; $S_{(i)}$ - surface du sol occupée par un individu (i) au sein d'une placette P20, en m^2 ; 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).

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:

$$k_h = Tr / (\Delta\Psi / l) \quad (cm^3\ H_2O\ s^{-1}\ bars^{-1}\ arbre^{-1}) \quad [9]$$

Avec: k_h - conductivité hydraulique, en $cm^3\ H_2O\ s^{-1}\ bars^{-1}\ arbre^{-1}$; Tr – transpiration, en cm^3 ; $\Delta\Psi$ - 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 »:

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

Ainsi: Abs – absorption racinaire, en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{s}^{-1}$; Ψ_{sol} – potentiel hydrique du sol, en bars; Ψ_{racines} – potentiel hydrique des racines (porte greffe), en bars; Ψ_{tronc} – potentiel hydrique du tronc (greffon), en bars; Ψ_{feuilles} – potentiel hydrique des feuilles, en bars; Tr - transpiration en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{s}^{-1}$; $r_{\text{sol-racines}}$ – résistance au passage de l'eau du sol aux racines, en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1} \text{bars}^{-1}$; $r_{\text{racines-tronc}}$ – résistance au passage de l'eau des racines (porte greffe) au tronc (greffon) à travers la jonction de greffage, en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{s}^{-1} \text{bars}^{-1}$; $r_{\text{tronc-feuilles}}$ – résistance au passage de l'eau à travers du bas du tronc (greffon) aux feuilles, en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O arbre}^{-1} \text{s}^{-1} \text{bars}^{-1}$.

Dispositif expérimental (tableau 1)

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/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.

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.

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^{té} PMS Instrument® ; cette chambre est portable et alimentée par une bouteille d'azote (précision des mesures $\pm 0,5$ bars).

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^{er}) mesure de la température de l'air ambiant; (2^{ème}) 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^{ème}) 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: $f.e.m. = a\Psi + b$ (Ψ_{racines} ou Ψ_{tronc}).

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.

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.

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
Évapotranspiration 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⁻¹, valeur comparable à celle mentionnée par Monteny (1987) pour la même région ($3,5$ mm jour⁻¹). 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 $15,6$ dm³ arbre⁻¹ heure⁻¹, 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 %).

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 $11,5$ dm³ H₂O arbre⁻¹ heure⁻¹, soit une moyenne de $Tr = 12,1$ dm³ H₂O arbre⁻¹ 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 $11,8$ dm³ H₂O arbre⁻¹ heure⁻¹, soit une moyenne de $Tr = 10,4$ dm³ H₂O arbre⁻¹ 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^{er} 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^e) pour les racines $\Psi_{\text{racines}} = -3,9$ bars et $-4,2$ bars en mai et $\Psi_{\text{racines}} = -4,9 (\pm 0,1)$ et $-5,2 (\pm 1,1)$ bars en septembre; 2^e) pour les troncs $\Psi_{\text{tronc}} = -4,6 (\pm 0,9)$ et $-5,6 (\pm 1,3)$ bars en mai et $\Psi_{\text{tronc}} = -5,6 (\pm 1,1)$ 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.

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 » $r_{\text{stomatique}} = 1,2$ 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).

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).

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^{er}) 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^{ème}) 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^{ème}) 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^e) 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^e) 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 Créatin (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*. Symosia of the Soc. Exp. Biol., New York, Academic Press, **19**, 205-234.

MONTEITH J.L. et UNSWORTH M.H., 1990 : *Principles of environmental physics*. 2nd 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., CRESTIN 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.

Tableaux, figures et photos

Tableau 1 - Matériels et méthodes utilisés lors de missions en Cote d'Ivoire en 2004. *Sampling and measurement technique used on the study plot in Cote d'Ivoire during 2004* (Nizinski et al., 2009)

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)

Tableau 3 - Plantation d'hévéas des individus « sains » (S16-S17-S18) et « nécrosés » (N1-N2-N3) à Bongo, placette d'étude: résistance stomatique ($r_{\text{stomatique}}$); potentiel hydrique moyen journalier des feuilles (Ψ_{feuilles}); potentiel hydrique moyen du xylème (des troncs et des racines) (Ψ_{tronc} et Ψ_{racines}) et potentiel hydrique du sol (Ψ_{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_{stomatal}), mean daily leaf and xylem water potential of stem and root (Ψ_{stem} and Ψ_{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*

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 $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1}$) et conductance hydraulique du xylème (des troncs et des racines) ($1/r_{\text{racines-tronc}}$; $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1} \text{bars}^{-1}$) 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 , $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1}$) and xylem conductance (stem and roots) ($1/r_{\text{roots-stem}}$; $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1} \text{bars}^{-1}$) 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* (Nizinski et al., 2009)

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

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

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^{-1} ; surface terrière de $10 \text{ m}^2 \text{ha}^{-1}$; volume de bois de $79,3 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$; 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⁻¹; total basal area 10 m² ha⁻¹; total wood production 79.3 m³ ha⁻¹; mean annual leaf area index 3.2; rooting depths 4 m*

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)*

Photo 3abc – Mesures de la résistance stomatique ($r_{\text{stomatique}}$, en s cm⁻¹) avec un poromètre de type AP4, Delta-T-Devices[®]. *Measurement of the stomatal resistance (r_{stomatal} , s cm⁻¹), with a AP4 Delta-T-Devices[®] porometer*

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

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

Photo 6abc - Mesure du potentiel hydrique du xylème (Ψ_{racines} et Ψ_{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 (Ψ_{stem} and Ψ_{root} ; bars) (Nizinski et al., 2010)*

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

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.*

Tableau 1

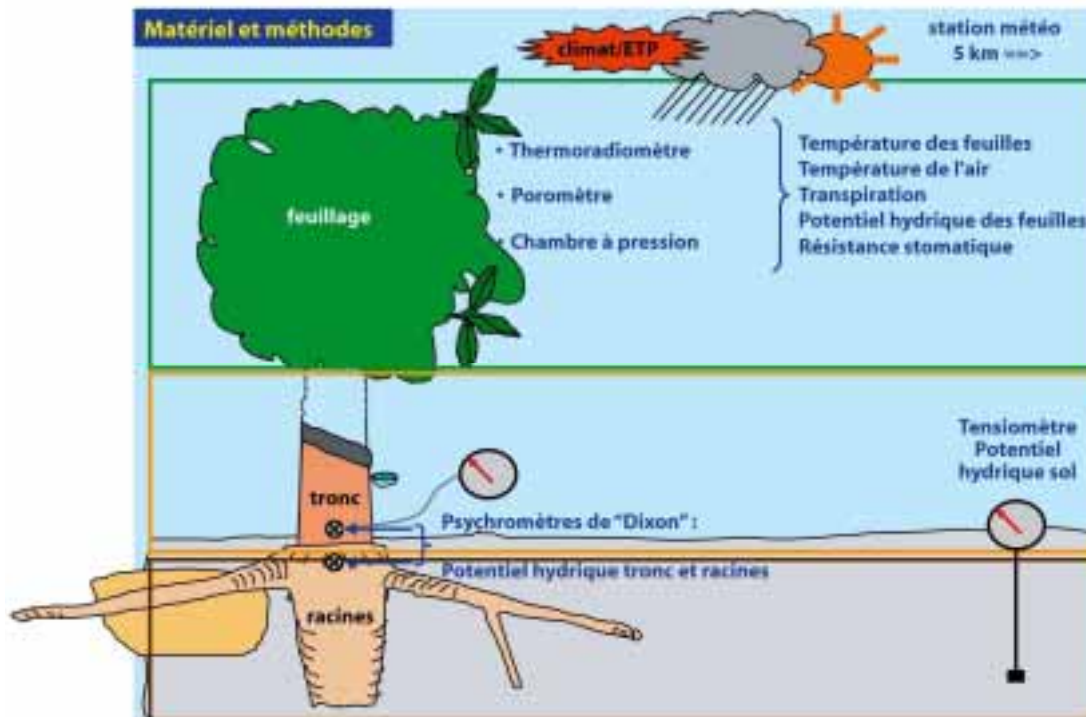


Tableau 2

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 ⁻¹)	333
Surface du sol occupée par un arbre (m ²)	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 ² ha ⁻¹	10,00
Indice foliaire (LAI, m ² m ⁻²)	3,24

Tableau 3a




Résultats de mai 2004		grandeurs mesurées	2 individus sains	3 individus nécrosés	différence	significatif
 <p>feuillage</p>	T_f (°C)	27,9	28,0	0,1	NS	
	T_{air} (°C)	27,1	27,1	0,0	NS	
	r_s (s cm ⁻¹)	1,2	1,8	0,6	S	
	Ψ_f base (bars)	-3,2	-3,6	0,4	NS	
	Ψ_f moy jour	-6,0 ± 0,91	-8,6 ± 1,40	2,6	S	
 <p>tronc</p>	Ψ_t base (bars)	-4,1	-4,1	0,0	NS	
	Ψ_t moy jour	-4,6 ± 0,87	-5,6 ± 1,32	1,0	S	
 <p>racines</p>	Ψ_r base (bars)	-4,1	-4,1	0,0	NS	
	Ψ_r moy jour	-3,9	-4,2	1,0	NS	
	Ψ_{sol} (bars)	-0,1	-0,1	0,0	NS	

Tableau 3b

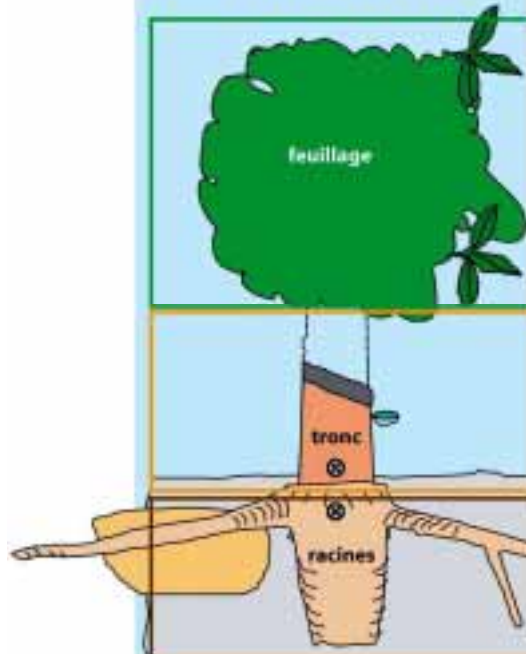
Résultats de septembre 2004		grandeurs mesurées	5 individus sains	5 individus nécrosés	différence	significatif
	T_f (°C)	26,6	26,5	0,1	NS	
	T_{air} (°C)	26,0	26,0	0,0	NS	
	r_s (s cm ⁻¹)	1,6 ± 0,49	2,8 ± 0,53	1,6	S	
	Ψ_f base (bars)	-3,8	-3,4	0,4	NS	
	Ψ_f moy jour	-6,1 ± 1,04	-7,4 ± 1,35	1,3	S	
	Ψ_t base (bars)	-4,0	-4,0	0,0	NS	
	Ψ_t moy jour	-5,6 ± 1,09	-7,2 ± 0,97	1,2	S	
	Ψ_r base (bars)	-4,4	-4,0	0,4	NS	
	Ψ_r moy jour	-4,9 ± 0,09	-5,2 ± 1,10	0,3	NS	
	Ψ_{sol} (bars)	-0,1	-0,1	0,0	NS	

Tableau 4


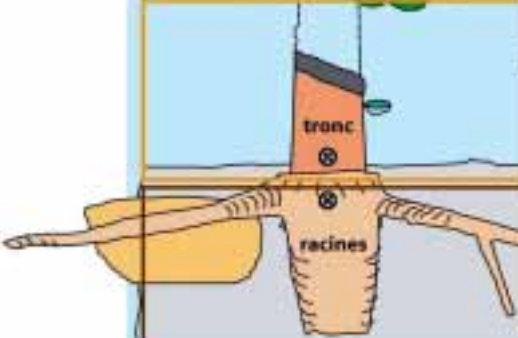
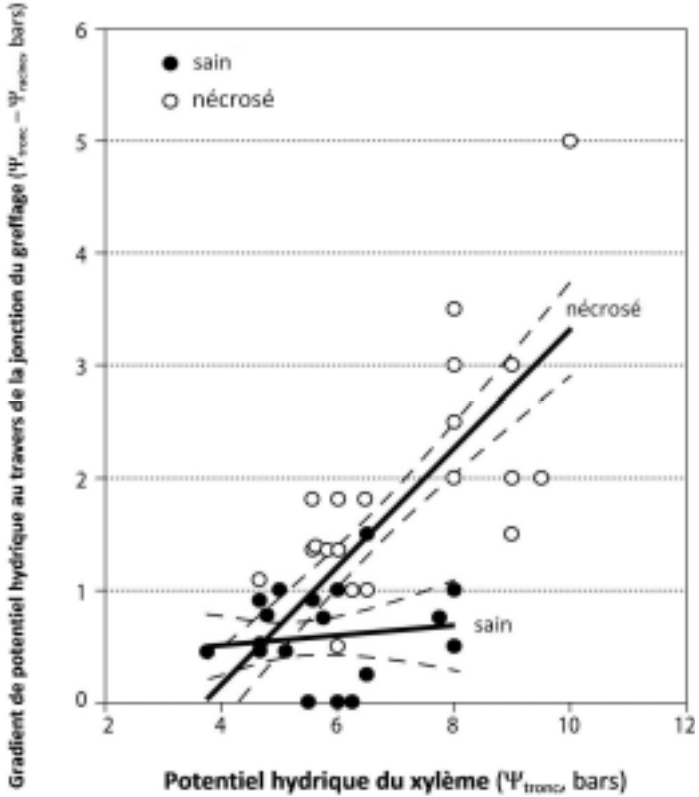
Résultats de mai et septembre		grandeurs mesurées	6 individus sains	6 individus nécrosés	différence	significatif
 feuillage	Transpiration en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1}$	1,9±0,11	1,4 ±0,31	0,5	S	
	Conductance du tronc aux feuilles, en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1} \text{bars}^{-1}$	0,3 ±0,17	0,2 ±0,18	0,1	NS	
 tronc racines	Conductance des racines aux feuilles, en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1} \text{bars}^{-1}$	0,6 ±0,08	1,6 ±0,11	1,0	S	
	Conductance des racines au tronc, en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1} \text{bars}^{-1}$	0,2 ±0,06	1,1 ±0,31	0,9	S	

Figure 1



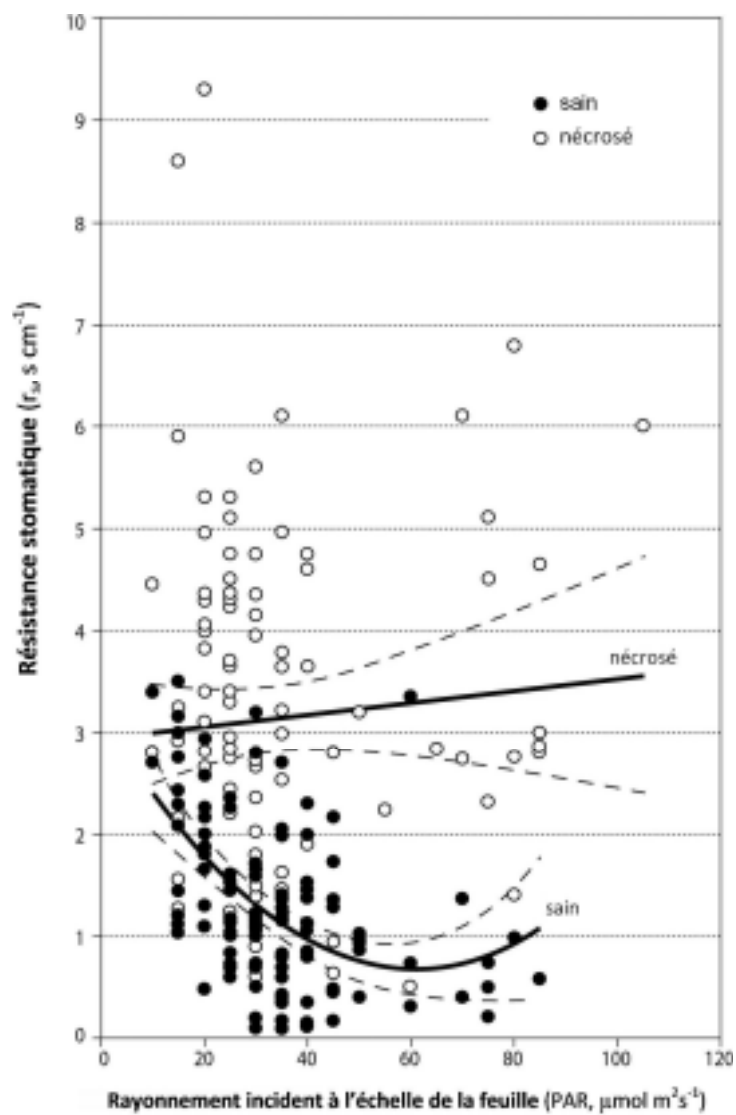


Figure 2

Photo 1



Photo 2a



Photo 2b



Photo 3a





Photo 3b



Photo 3c

Photo 4





Photo 5a



Photo 5b



Photo 6a



Photo 6b



Photo 6c

Photo 7a



Photo 7b



Photo 8a



Photo 8b

