



Institut de Recherche pour le Développement IRD

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

**« Zastosowania praktyczne bioklimatologii w
przemyśle kauczukowym »**

(Applications de la bio-climatologie à l'industrie du caoutchouc)

**Conférence à Wroclawska Rada Federacji Naukowo-
Technicznych - NOT (Scientific & Technical Society Federation),
Wrocław, Pologne**

Le 24 novembre 2013

JERZY JAN NIZINSKI

Institut de Recherche pour le Développement – I.R.D., UMR 211 « BIOEMCO -
Biogéochimie et écologie des milieux continentaux - Interactions biologiques dans
les sols », 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

KILKA ARTYKUŁÓW AUTORA OPUBLIKOWANYCH W CZASPISMACH NAUKOWYCH:

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., 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
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., Mabiola-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., Mabiola-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 phytothérapique de l'arbre à thé (*Melaleuca alternifolia*). *La Lettre Phytothérapique 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., Pontallier 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. (edifor), *Primates of Flooded Habitats*, Cambridge University Press, London, pp. 10-33 (sous presse)
35. Nizinski J.J., & Montoroi 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., & Montoroi 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
37. Nizinski J.J., 2011. «Modélisation des systèmes sol-plante-atmosphère, instrumentation ». In: Mohammed Hachicha, Erik Braudeau & Jean-Pierre Montoroi (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 »*, INGRES, DG/ACTA, QEERI & IRD, Tunis, Tunisie, pp. 61-70
38. Nizinski J.J., Braudeau E., Lointier M. & Montoroi 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, INGRES-Ariana, Tunis, Tunisie, 100 pages
39. 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
40. 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
41. 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
42. 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
43. 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.
44. 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
 45. 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.
 46. Galat G., Galat-Luong A. & Nizinski J.J., 2008b. « Our cousins' chimpanzees and baboons face global warming digging wells and filtrating their drink water ». In: (Editeurs), Proceedings of XIII^{ème} Congrès Mondial de l'Eau: Changements globaux et ressources en eau, Montpellier, pp. 1-5.
 47. Nizinski J.J., Loumeto J.J., Ayoma M.-B., Mabiala-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
 48. 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
 49. 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
 50. 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
 51. 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
 52. Nizinski J.J., Morand D. & Fournier Ch., 1995. « Impact of land clearance on the thorn scrub water balance (North Senegal)", In: B. Wiezik (éditeur), Hydrological Processes in the Catchment, Cracow University of Technology Press, Cracow, pp. 411-426
 53. 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
 54. 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
 55. 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
 56. 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
 57. Pontauiller 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

Spis treści:

STRESZCZENIE.....	3
1. WPROWADZENIE.....	3
2. SYSTEM : GLEBA – ROŚLINA – ATMOSFERA – CONTINUUM	4
3. BADANIA TERNOWE W STREFACH TROPIKALNYCH.....	7
4. ANALIZA BIOKLIMATYCZNA NEKROZY DRZEW KAUCZUKOWYCH.....	19
5. BILAN HYDRIQUE COMPARE D'UNE SAVANE ET D'UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS DANS LE BASSIN DU KOUILOU (REPUBLIQUE POPULAIRE DU CONGO).....	34
6. BIOCLIMATOLOGICAL ANALYSIS OF THE BARK NECROTIC RUBBER TREE IN CÔTE D'IVOIRE PLANTATIONS.....	49
7. TO USE OF THE DIXON-TYREE STEM HYGROMETER IN A RUBBER TREE PLANTATION.....	50
8. MESURE DE L'EVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VEGETAUX DANS LES ZONES ARIDES : PROBLEMES ET SOLUTIONS.....	51

« Zastosowania praktyczne bioklimatologii w przemyśle kauczukowym »

Streszczenie

Bioklimatologia jest to nauka, którą zdefiniować można jako studia relacji między organizmami żyjącymi i środowiskiem - środowisko będąc zespołem czynników fizycznych, chemicznych i biologicznych.

Podług typu organizmu, bioklimatologia może odnosić się do ludzi, do zwierząt bądź też do roślin. Bioklimatologia człowieka jest częścią nauk medycznych, bioklimatologia zwierząt - nauk weterynaryjnych, a bioklimatologia roślinna, tutaj zaprezentowana, jest częścią nauk rolniczych.

Bioklimatologia roślinna znajduje się na skrzyżowaniu kilku nauk: (a) fizyki wody glebowej; (b) ekofizjologii roślin; (c) mikrometeorologii i (d) klimatologii.

Między innymi, ta ostatnia, klimatologia, wykorzystuje wyniki badań bioklimatologów w analizie i w modelowaniu cyklu globalnego atmosfery. Atmosfera jest jednym z systemów analizowanym przez klimatologię, trzy inne systemy to są oceany, kontynenty i kriosfera. To właśnie na kontynentach, w pobliżu powierzchni ziemi, gdzie mają miejsce podstawowe zjawiska determinujące klimat (bilans energetyczny, ewapotranspiracja). Na kontynentach zachodzą zjawiska przepływu mas (pary wodnej, dwutlenku węgla) i energii (ciepło odczuwalne i ciepło utajone) ; te zjawiska są tematem studiów bioklimatologii.

Zastosowania praktyczne bioklimatologii do rozwiązania problemów z którymi zmagają się przemysł ilustrujemy tutaj studiami nad przyczynami rozwoju patologii drzew kauczukowych; - badania te wykonane zostały na zamówienie koncernu Michelin®.

Słowa kluczowe: bioklimatologia, ekofizjologia roślinna, bilans wodny, bilans energetyczny, parowanie roślinne, modelowanie

1. Wprowadzenie

Szanowni Państwo, witam serdecznie i na wstępie:

* chciałbym podziękować Panu Prezesowi Lucjanowi Sobkowiakowi oraz Dyrektorowi Stacji Polskiej Akademii Nauk za zorganizowanie tego spotkania i umożliwienie wygłoszenia referatu;

* a Państwu serdecznie dziękuje za obecność.

Na pierwszych diapozytywach prezentuję Państwu treść wystąpienia; omówimy:

- tematykę naukową bioklimatologii,

- omówię system który nazywa się Gleba – Roślina – Atmosfera – *Continuum*, więc

* przepływy wody w glebie;

* w roślinie;

* i w atmosferze.

- mówił będę o moim osobistym doświadczeniu aby przybliżyć Państwu bioklimatologię, dziedzinę, która jest, być może, oddalona od Państwa zainteresowań naukowych.

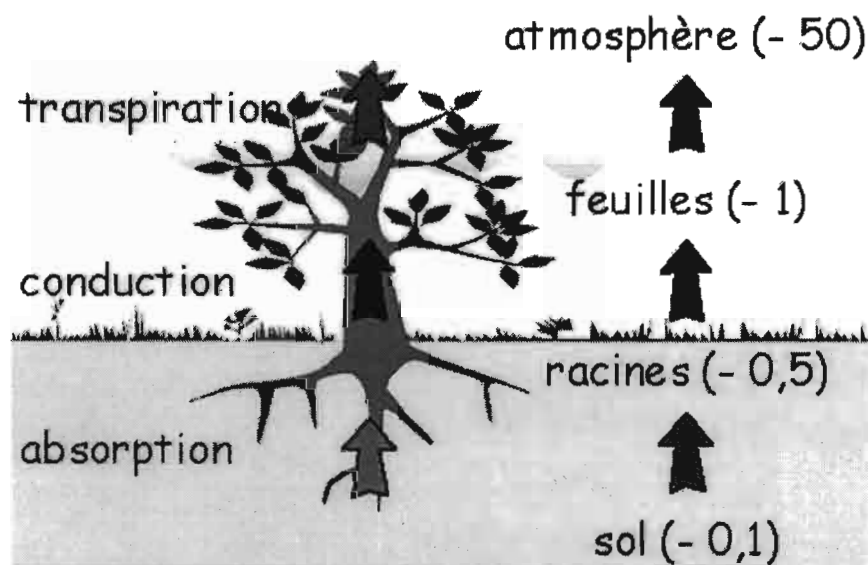
- i jeśli będziemy mieli czas to będę mówił o zastosowaniach praktycznych bioklimatologii do rozwiązania problemów z którymi zmagają się przemysł ilustrując to studiami nad przyczynami rozwoju patologii drzew kauczukowych; - badania te wykonane zostały na zamówienie koncernu Michelin®.

Zacznijmy od odpowiedzi na pytanie czym zajmuje się bioklimatologia.

2. System : Gleba – Roślina – Atmosfera – Continuum

Pracuję od 1976 nad cyklem stacjonarnym bilansu wodnego (na polletku experimentalnym), nad parowaniem wodnym czyli ewapotranspiracją rzeczywistą pokryw roślinnych, i lasów w szczególności, jeden z tematów studiów w bioklimatologii.

Koncepcje aktualne cyklu bilansu wodnego, na przykład w lasach, opierają się na zasadzie, że las (bądź plantacja leśna) i jego elementy konstytucyjne, gleba, roślina i atmosfera stanowią dynamiczną całość fizyczną w której wszystkie zjawiska przepływu wody, z jednego elementu na drugi, zależą jedno od drugiego, jak z sobą powiązane ogniwa łańcucha.



Rysunek n°1 - Jednolity system nazwanym „Gleba – Roślina – Atmosfera – Continuum”, przepływ wody ma miejsce z poziomu energii potencjalnej większej ($\Psi_{\text{gleba}} = -0,1 \text{ bars}$) do miejsca gdzie ta energia jest niższa ($\Psi_{\text{atmosfera}} = -50 \text{ bars}$)

W tym jednolitym systemie (**Rysunek n°1**) nazwanym Gleba – Roślina – Atmosfera – Continuum, przepływ wody ma miejsce z poziomu energii potencjalnej większej do miejsca gdzie ta energia jest niższa, jeśli oczywiście zaakceptujemy ze pojecie « potencjału wodnego » można zastosować do gleby, do rośliny i do atmosfery.

W ten też sposób, przepływ wody np w lesie składa się z

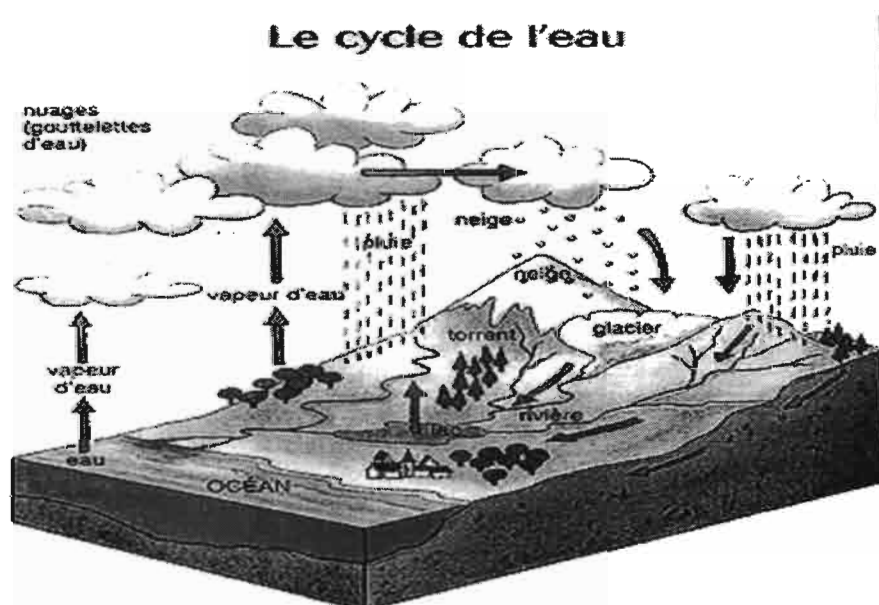
- Przepływu z gleby do korzeni;
- Absorpcji przez korzenie;
- Transportu w ksylemie z korzeni do gałęzi i aż do liści,
- Ewaporacji z przestrzeni międzykomórkowych w liściach, i dyfuzji pary wodnej poprzez szparki stomatyczne do przyściennej warstwy powietrza na poziomie liści, i w końcu poprzez warstwę turbulentną powietrza, para wodna dyfunduje do warstwy atmosfery zewnętrznej.

Bioklimatologia znajduje się więc na skrzyżowaniu kilku nauk:

- Fizyki wody glebowej (analiza podsystemu « Gleba »),
- Ekofizjologii roślin (podsystem « Roślina »),
- Mikrometeorologii (podsystem « Atmosfera ») i
- Klimatologii.

Ta ostatnia, klimatologia, wykorzystuje wyniki badań bioklimatologów w analizie i w modelowaniu cyklu globalnego atmosfery.

Atmosfera jest jednym z systemów analizowanym przez klimatologię, trzy inne systemy to są oceany, kontynenty i kriosfera (**Rysunek n°2**).



Rysunek n°2 – Schemat cyklu hydrologicznego: faza atmosferyczna – parowanie, przenoszenie pary wodnej w atmosferze i jej kondensacja ; faza lądowa – opad atmosferyczny, odpływ powierzchniowy, wsiąkanie, odpływ podziemny.

To właśnie na kontynentach, w pobliżu powierzchni ziemi, gdzie mają miejsce podstawowe zjawiska determinujące klimat (bilans energetyczny, ewapotranspiracja).

Na kontynentach zachodzą zjawiska przepływu mas (pary wodnej, dwutlenku węgla) i energii (ciepło odczuwalne i ciepło utajone); te zjawiska są tematem studiów bioklimatologii.

Bioklimatologia dotyczy, między innymi, pomiarów i metod opisu rozkładu pionowego parametrów charakteryzujących stan atmosfery, takich jak: temperatura powietrza, wilgotność powietrza, prędkość wiatru,... i to w zakresie od 0 do 30 metrów nad poziomem ziemi nazwanym „warstwa graniczna powierzchni ziemi”.

To w tej „warstwie granicznej” profile pionowe charakteryzujące stan atmosfery zmieniają się znacząco w przestrzeni i w czasie.

Analiza procesów fizycznych które oddziałują na opisane powyżej trzy podsystemy (Gleba – Roślina – Atmosfera) i które to procesy mają miejsce w sposób równoległy z zdysocjowanymi «rytmami czasowymi» nakładając specyficzne problemy metodologiczne bioklimatologii: trzeba wziąć pod uwagę skalę fenomenologiczną (czas trwania procesów realnych), a także, skalę narzuconą poprzez metody pomiarowe oraz poprzez modelowanie tych procesów.

Analiza przestrzenna tych procesów ma miejsce od skali liści do skali jednostki, od grupy jedynostek do populacji i aż to skali regionalnej.

Skala czasowa procesów mierzonych rozciąga się od sekundy (na przykład opór szparkowy) do kilku dni (na przykład zmiany w wskaźniku ulistnienia, LAI) aż to tygodnia czy więcej (na przykład ilość wody w glebie, absorpcja korzeniowa, czy inne...).

Inną jeszcze charakterystyką z którą obserwator jest skonfrontowany, usiłując opisać system skomplikowany w sposób mechanistyczny, jest fakt że nie zawsze posiadamy metody wystarczająco precyzyjne aby opisać pewne zjawiska, jak na przykład pomiary gradientów przepływów mikroskopijnych w sąsiedztwie najbliższym korzeni (metody pomiarowe objętości wody i potencjału wodnego w glebie zależą od obecności relatywnie dużej objętości glebowej którą to objętość maskuje mikro gradienty).

3. Badania terenowe w strefach tropikalnych

Uczestniczyłem w badaniach dotyczących trzech głównych problemach:

- Analiza determinizmu przepływów w systemie Gleba – Roślina – Atmosfera, SPAC, analiza systemów regulacji tych przepływów (modele fenologiczne, modele oporów szparkowych, modele absorpcji wody przez korzenie).
- Wpływ zmian pokryw roślinnych (wyręb i zadrzewianie) na ewapotranspirację i ich wpływ na klimat regionalny.
- Wpływ wody i energii jako czynników ograniczających produkcję roślinną.

Pracowałem nad ekosystemami o różnych cechach morfologicznych: pokrycia trawiaste zwarte (savanny), pokrycia leśne zwarte (ekosystemy naturalne i plantacje leśne), pokrycia trawiaste niehomogeniczne (savanny krzewiaste z obszarami trawiastymi i zagajnikami krzewiastymi i drzewiastymi).

Obecnie, pokrycie trawiaste niehomogeniczne jest traktowane w modelowaniu jako pokrycie roślinne rozproszone z niekompletnym pokryciem powierzchni gleby.

Prace badawcze prowadziłem w różnych strefach klimatycznych:

- Strefa umiarkowana (lasy dębowe w Europie);
- Strefa tropikalna wilgotna (las tropikalne deszczowe w Gwianie francuskiej; plantacje Eukaliptusów i savanny w Kongo-Brazzaville; plantacje drzew kauczukowych w Ghanie i na Wybrzeżu Kości Słoniowej, w Tajlandii i Indonezji) oraz
- W strefie subtropikalnej suchej (savanna drzewiasta w Senegalu oraz plantacje pomarańczy w delcie Nilu w Egipcie).

Badania dotyczyły cyklu obiegu wody w skali regionu, a uzyskane wyniki są wykorzystywane w modelach globalnych.

Teraz streszczę pokrótce tematy moich poszukiwań naukowych od mojego doktoratu obronionego w Laboratoire d'Ecologie Végétale na Uniwersytecie w Paris-Sud w Orsay.

To laboratorium, było dla mnie doskonałym początkiem gdyż pracowali tam naukowcy i liczni doktoranci z różnorodnych specjalności. Prace dotyczyły wszelkich procesów związanych z glebą (hydrologia, mikrobiologia), roślinami (fizjologia, ekofizjologia) i mikrometeorologia.

Dało mi to spojrzenie globalne na system Gleba – Roślina – Atmosfera na którym pracuję do dzisiaj.

Więc, po obronie mojej pracy doktorskiej pracowałem w Senegalu (**Rysunek n°3**).



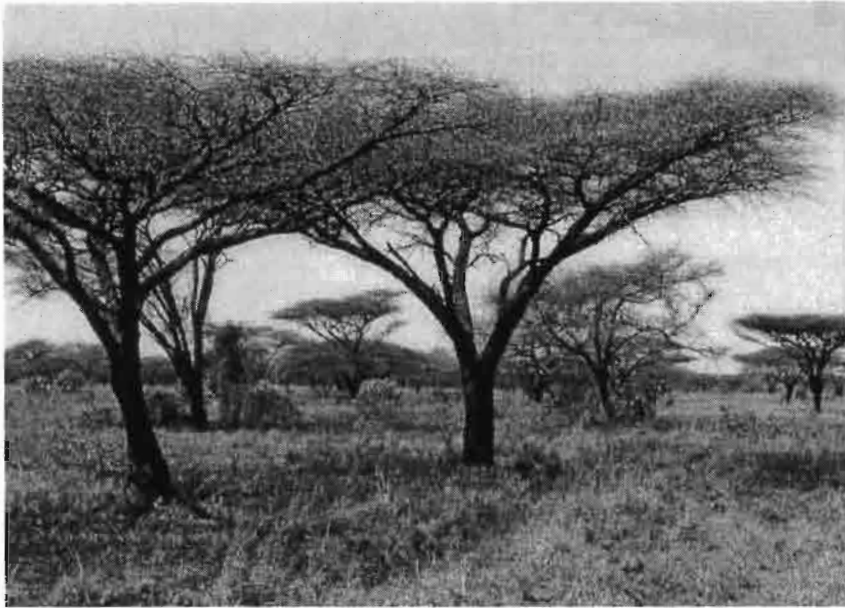
Rysunek n°3 – Położenie Senegalu w Afryce zachodniej.

Możecie tutaj Państwo zauważyć produkcję artystyczną z regionu północno-zachodniego Senegalu (**Rysunek n°4**).



Rysunek n°4 – Produkcja artystyczna z regionu północno-zachodniego Senegalu

Tutaj widać step strefy półpustynnej (**Rysunek n°5**).



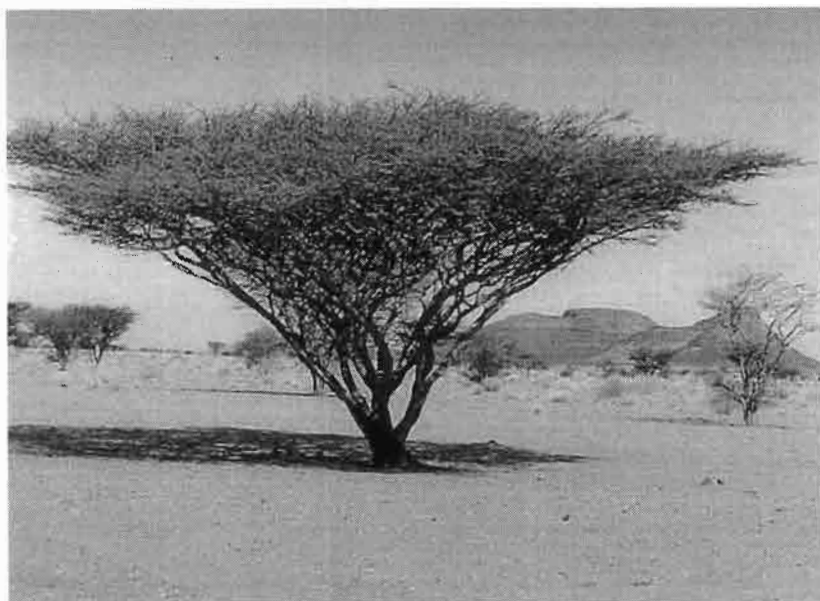
Rysunek n°5 – Step strefy półpustynnej - zagajnik Akacji raddiana

Tam, stację badawczą którą zbudowałem w terenie (**Rysunek n°6**).

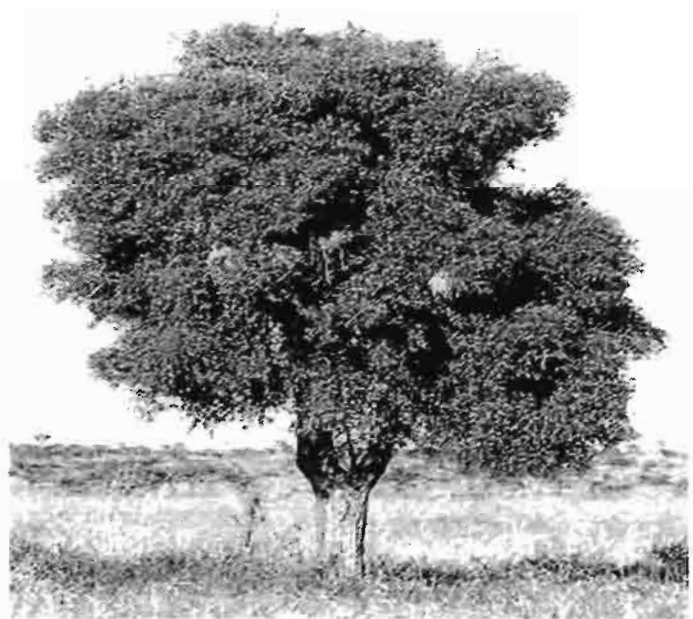


Rysunek n°6 – Stacja badawcza na północy Senegalu przy rzece Senegal (Souilene)

Tutaj, step z Akacją raddiana (**Rysunek n°8**) i z *Balanitesem aegyptiaca* nad którymi pracowałem (**Rysunek n°9**).



Rysunek n°7 – Akacja raddiana



Rysunek n°8 – Balanites aegyptiaca

Tutaj, zauważyć możecie Państwo sposób pomiaru ilości wody spływającej po pniu w badaniach pomiarów bilansu wodnego w zagajniku Akacji raddiana (**Rysunek n°9**)

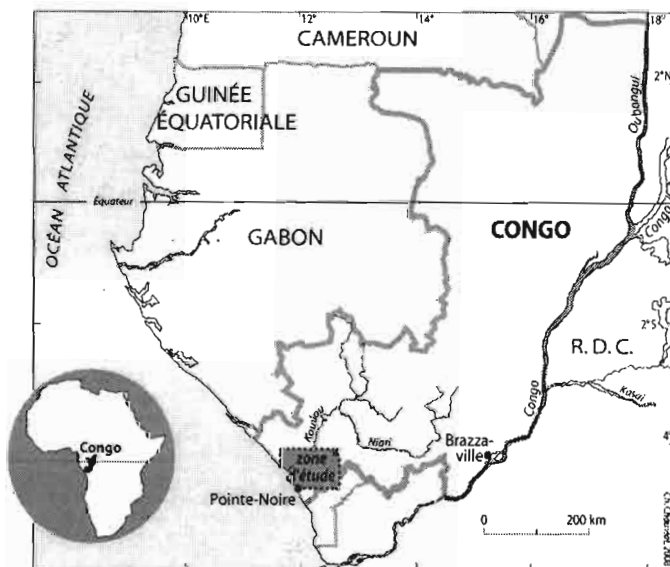
- Ten step był kiedyś, tak zwanym, lasem «jasnym» Akacji senegal z 75 % pokryciem terenowym;
- Akacie progresywnie zniknęły pod wpływem dwóch czynników, wyrębu drzew do użytku domowego oraz nadmiernego wypasu;

- miałem więc sposobność studiować tutaj wpływ wycinania lasu na ewapotranspirację rzeczywistą lokalną.



Rysunek n°9 – Pomiar ilości wody spływającej po pniu w badaniach pomiarów bilansu wodnego w zagajniku Akacji raddiana

Następnie pracowałem w Kongo-Brazzaville (**Rysunek n°10**), w strefie tropikalnej wilgotnej (**Rysunek n°11**).

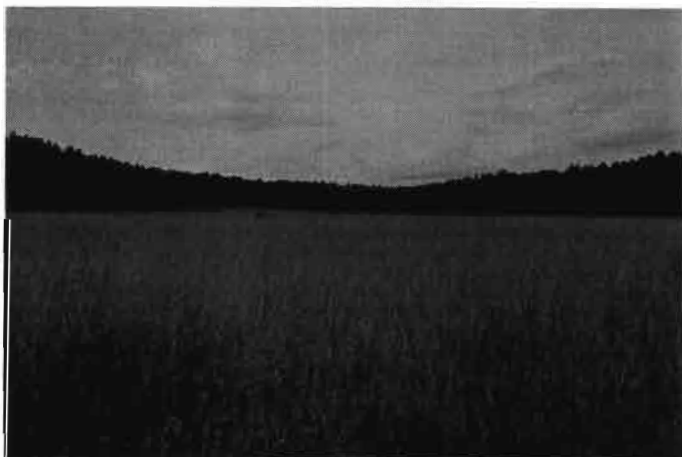


Rysunek n°10 – Localisation de la zone d'étude: région du Kouilou, sur la façade atlantique de la République du Congo (surface de 13.315 km², située entre le

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 $P_{149-98}=1188,4$ 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 $24,9^{\circ}\text{C}$ ($t_{\text{max}}=28,2^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{min}}=21,9^{\circ}\text{C}$), une humidité relative de l'air de $81,1\%$ ($H_{\text{max}}=95,5\%$, $H_{\text{min}}=66,4\%$) ; 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 ferralitiques fortement dessaturés à texture sablo-argileuse. Les deux stations d'études sont situées à 40 km de Pointe-Noire à proximité du lieu-dit Kondi (latitude $4^{\circ}34'S$, longitude $11^{\circ}54'E$, altitude: 125 m).



Rysunek n°11 – Golf de Diosso nad Oceanem Atlantyckim w pobliżu Pointe-Noire (Kongo-Brazzaville)



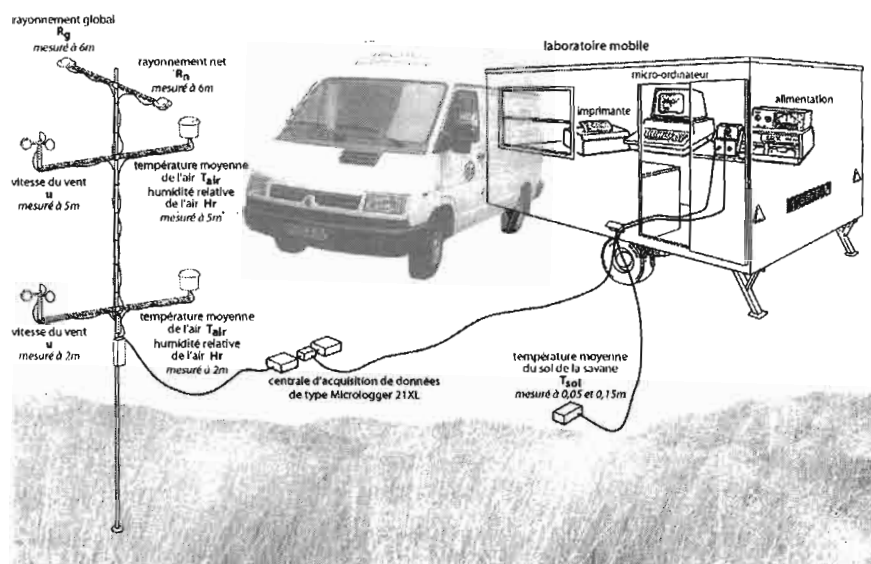
Rysunek n°12 – Ekosystem pierwotny – savanna pokryta drzewą *Loudetia arundinacea* nad Oceanem Atlantyckim w pobliżu Pointe-Noire (Kongo-Brazzaville)



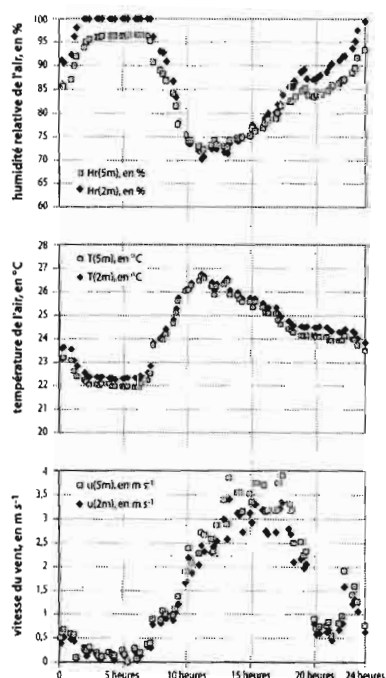
Rysunek n°13 – Na pierwszym planie – savana - ekosystem pierwotny; na drugim planie ekosystem wtórny - plantacja Eukaliptusów - nad Oceanem Atlantyckim w pobliżu Pointe-Noire (Kongo-Brazzaville)



Rysunek n°14 – Osprzęt badawczy do pomiaru bilansu energetycznego



Rysunek n°15 – Osprzęt badawczy do pomiaru parowania roślinnego z użyciem metody „Bowena”

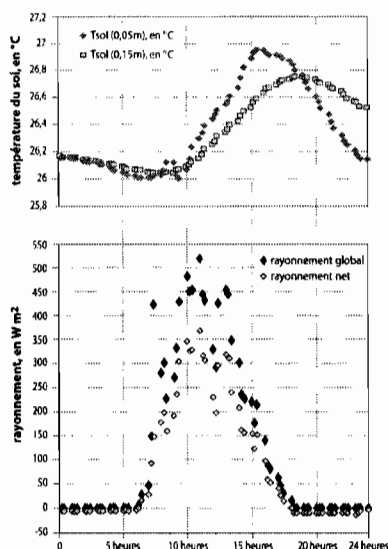


Rysunek n°16 – Evolution au cours de la journée du 29 septembre 1998 (a) de la température moyenne de l'air (T_{air}), de l'humidité relative de l'air (Hr), de la vitesse du vent (u) à 2,0 et 5,0 m au-dessus de la surface du sol de la savane ; (b) de la température du sol à 0,05 et 0,15 m de profondeur, du rayonnement global (R_g) et

rayonnement net (R_n) à 6,0 m au dessus de la surface du sol de la savane (Nizinski et al. 2009¹)

Pracowałem :

- w nadmorskiej savannie (**Rysunek n°13**) która jest ekosystemem naturalnym z tego regionu, tutaj na 1^{ym} planie;
- i w plantacji Eukalyptusowej zainstalowanej na tej savannie i której drewno przeznaczone jest do przemysłu papierniczego (**Rysunek n°14**)
- tam też, mogłem analizować wpływ zadrzewiania na ewapotranspirację rzeczywistą lokalną (**Rysunek n°15**) tutaj, zauważcie Państwo osprzęt badawczy do pomiaru bilansu energetycznego oraz pomiarów według metody Bowena (**Rysunek n°16**) (**Rysunek n°17**) (**Rysunek n°18**)
- tutaj widać aparaturę do pomiaru bilansu wodnego w glebie – pomiar opadu (**Rysunek n°19**)
- tam widzimy sondę neutronową do pomiaru objętości wody w glebie (**Rysunek n°20**)
- pomiary opadów netto (**Rysunek n°21**)
- plantacja wybrana jako poletko doświadczalne (**Rysunek n°22**)
- ogólny widok aparatury do pomiaru bilansu wodnego na plantacji (**Rysunek n°23**) i na savannie (**Rysunek n°24**)
- aparatura Müntza do pomiaru przewodności hydraulicznej gleby (**Rysunek n°25**)
- lizymetry wykorzystane w szkółce leśnej Eukalyptusów (**Rysunek n°26**)
- zbiór traw do pomiaru biomasy (**Rysunek n°27**)
- selekcja gatunkowa biomasy zebranych traw (**Rysunek n°28**), (**Rysunek n°29**).



Rysunek n°17 – Evolution au cours de la journée du 29 septembre 1998 (a) de la température moyenne de l'air (T_{air}), de l'humidité relative de l'air (H_r), de la vitesse du vent (u) à 2,0 et 5,0 m au-dessus de la surface du sol de la savane ; (b) de la

¹ 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

température du sol à 0,05 et 0,15 m de profondeur, du rayonnement global (R_g) et rayonnement net (R_n) à 6,0 m au dessus de la surface du sol de la savane (Nizinski et al. 2009²)



Rysunek n°18 – Bilans wodny w glebie – pomiar opadu



Rysunek n°19 – Pomiar objętości wody w glebie z użyciem sondy neutronowej

² 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



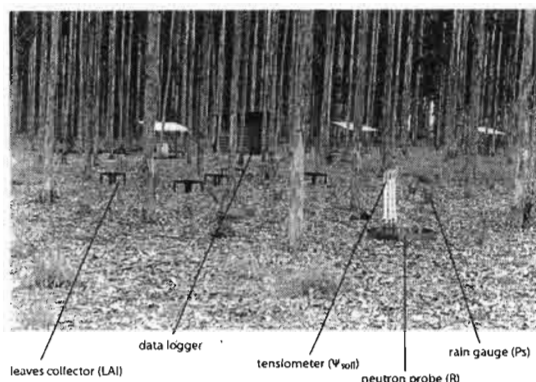
Rysunek n°20 – Pomiary opadów netto



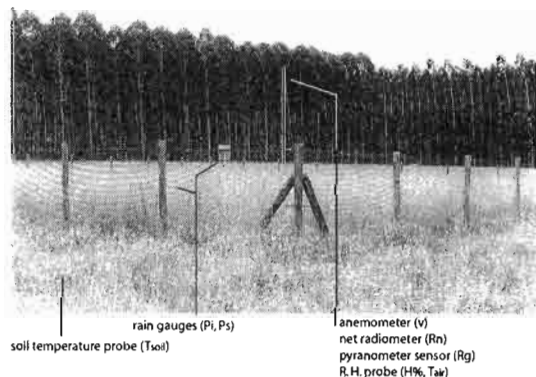
Rysunek n°21 – Plantacja Eukaliptusów zainstalowana na savannie, plantacja której drewno przeznaczone jest do przemysłu papierniczego (Kongo-Brazzaville)

Pracowałem również nad badaniem przyczyn rozwoju patologii drzew kauczkowych (**Rysunek n°30**)

- najpierw w Ganie (**Rysunek n°31**);
- następnie na Wybrzeżu Kości Słoniowej (**Rysunek n°32**) i w Tajlandji, wciąż w strefie tropikalnej wilgotnej;
- plantacje z przeznaczeniem dla przemysłu gumowego i wyrobów stolarskich (**Rysunek n°33**);



Rysunek n°22 – 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_{PPF}=309,2 mm; réserve utile R_{RU}=308,4 mm.



Rysunek n°23 – 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).



Rysunek n°24 – Aparatura Müntza do pomiaru przewodności hydraulicznej gleby



Rysunek n°25 – Lizymetry wykorzystane w szkółce leśnej Eukaliptusów



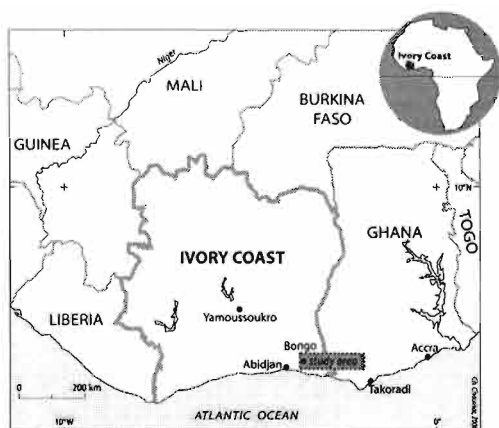
Rysunek n°26 – Zbiór traw do pomiaru biomasy



Rysunek n°27 – Selekcja biomasy zebranych traw



Rysunek n°28 – Selekcja gatunkowa biomasy zebranych traw



Rysunek n°29 – Położenie stacji badawczej na Wybrzeżu Kości Słoniowej



Rysunek n°30 – Takoradi na wybrzeżu Gany

4. Analiza bio-klimatologiczna przyczyn nekrozy drzew kauczukowych

J'ai été sollicité par l'entreprise Michelin®, pour travailler sur la nécrose corticale de l'hévéa.



Rysunek n°31 – Widok plantacji drzew kauczukowych w miejscowości Bongo (Wybrzeże Kości Słoniowej)

La nécrose corticale est une pathologie de l'écorce de l'hévéa.

Hervé CHRESTIN est biochimiste et Daniel NANDRIS est phytopathologiste de l'IRD. Ils travaillent depuis environ vingt ans sur la nécrose et ajoutent avec moi un volet écophysologique et bioclimatologique à l'étude de la nécrose corticale.



Rysunek n°32 – Daniel NANDRIS fitopatolog z Institut de Recherche pour le Développement (Montpellier), specjalista od nekrozy drzew kauczukowych

Nous sommes tous convaincus de l'intérêt des études pluridisciplinaires, et en bioclimatologie en particuliers, puisque c'est un domaine qui réunit sciences du sol, de la plante et de l'atmosphère.

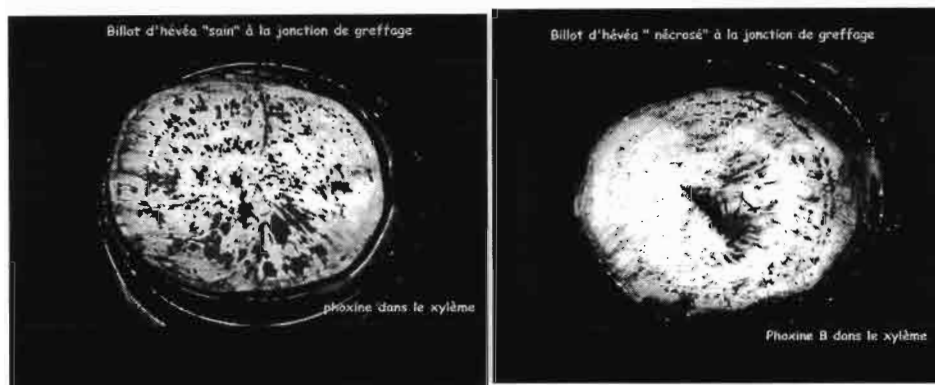
Donc, qu'est ce que la nécrose ? (**Rysunek n°32**).

C'est une pathologie de l'écorce de l'hévéa, l'hévéa qui produit le latex.

C'est une pathologie qui se retrouve dans toutes les plantations dans le monde entier.



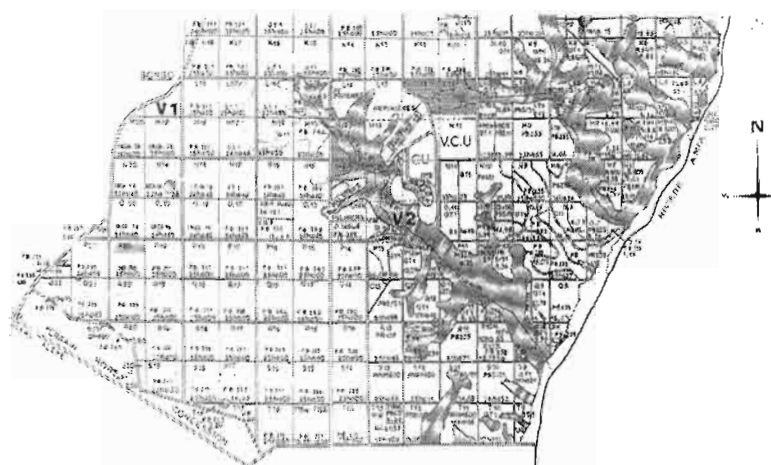
Rysunek n°33 – Położenie Wybrzeża Kości Słoniowej w Afryce zachodniej



Rysunek n°34 – 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 « sain » et **(b)** d'un individu « nécrosé ».

Cette pathologie n'a pas été observée chez les hévéas naturels, elle existe chez les hévéas cultivés qui sont tous greffés.

La porte greffe appartient à des clones variables d'un pays à l'autre.



Rysunek n°35 – Mapa plantacji drzew kauczukowych w Bongo (Wybrzeże Kosci Sloniowej)

Le greffon est l'un des dix clones les plus productifs en latex mais aussi en bois (qui sert comme bois d'œuvre).

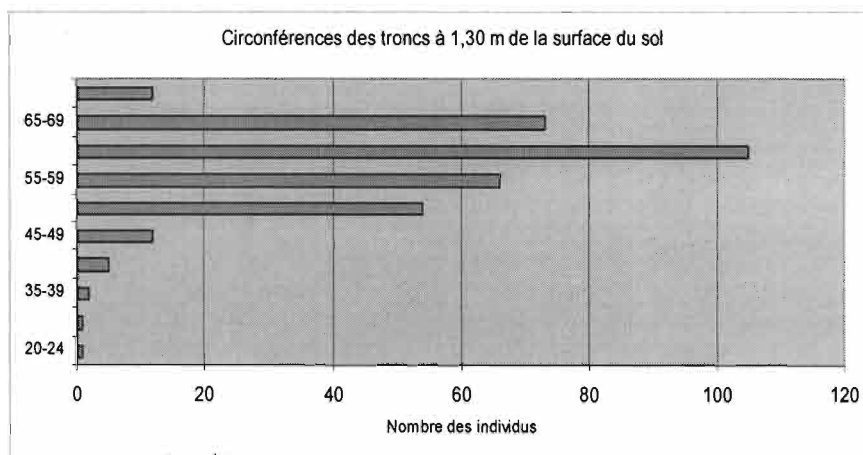
Les individus nécrosés ne se différencient des individus sains que par l'état de leur écorce

- la croissance n'est pas affectée,
- la morphologie et l'architecture du feuillage non plus
- le cambium et le xylème restent fonctionnels
- au niveau de l'écorce, les tissus producteurs de latex qui sont nécrosés sont repoussés vers l'extérieur et ne produisent plus de latex.

Les études phytopathologiques n'ont isolé aucun agent vecteur de cette maladie.



Rysunek n°36 – Station d'étude « P20 » vue de la nacelle



Rysunek n°37 – Histogramme des circonférences du tronc à 1,30 m du sol

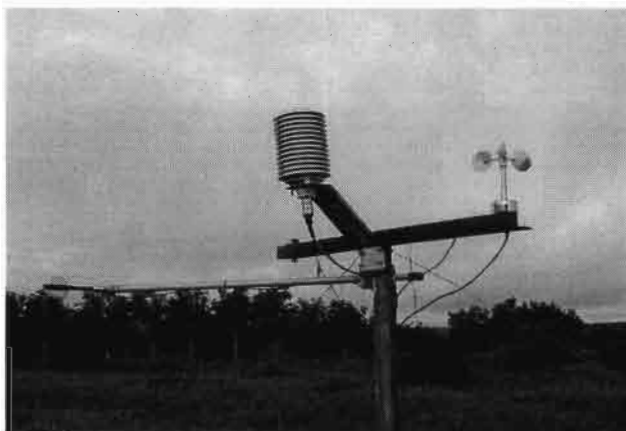
Des études hormonales sont en cours.

Des études biochimiques aussi, la nécrose ferait intervenir un dérivé du latex qui s'avèrerait toxique pour les tissus normalement producteurs de latex.

J'ai commencé par travailler au Ghana en 2003 (**Rysunek n°35**) dans une plantation qui comptait des hévéas nécrosés.



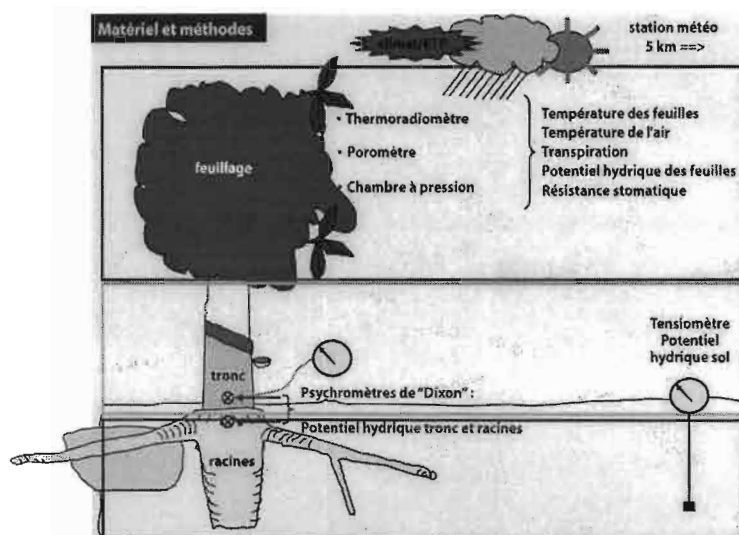
Rysunek n°38 - Station météorologique du site d'étude (mesures à 2 m au-dessus de la surface du sol: capteur de photons (Licor Quantum Sensors®), humidité relative de l'air et température moyenne de l'air (sonde Vaisala, HMP35AC®), vitesse du vent (anémomètre Vector®), rayonnement global (pyranomètre 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®.



Rysunek n°39 – 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®.

J'ai choisi quatorze individus, sept sains, sept nécrosés.

Ces arbres ont eu des conditions de croissance semblables.



Rysunek n°40 - Matériels et méthodes utilisés lors de missions en Cote d'Ivoire en 2004.



Rysunek n° 41 - Mesure de la température des feuilles à l'aide d'un thermoradiomètre (T_{feuilles} , en °C) de type DTMX de Raytek®.

J'ai découpé le tronc et prélevé un billot d'une épaisseur d'environ 10 cm qui comprenait la jonction de greffage.

Ce billot a été immédiatement plongé dans une solution de Phoxine B (**Rysunek n°36**).



Rysunek n°42 - Mesure du potentiel foliaire (Ψ_{feuilles} , en bars) avec une chambre à pression PMS®.

C'est un colorant rouge qui migre dans les vaisseaux conducteurs fonctionnels et qui atteint l'autre extrémité rapidement.

Sur les individus sains les 1^{re} taches sont apparues au bout de vingt secondes.



Rysunek n°43 - Sur les nécrosés au bout d'une minute (**Rysunek n°37**).

J'ai photographié les surfaces supérieures des billots au bout de 1 minute, 5 minutes puis 30 et 60 minutes pour les scanner et les planimétrer.



Rysunek n°44 - Mesures de la résistance stomatique ($r_{\text{stomatique}}$, en s cm^{-1}) avec un poromètre de type AP4, Delta-T-Devices®.

Le résultat - le transfert de Phoxine est plus rapide et plus important chez les individus sains que chez les nécrosés.

Suggérant ainsi un problème de transfert de l'eau dans les vaisseaux conducteurs au niveau de la jonction de greffage.



Rysunek n°45 - Mesures de la résistance stomatique ($r_{\text{stomatique}}$, en s cm^{-1}) avec un poromètre de type AP4, Delta-T-Devices®.

J'ai poursuivi l'étude en Côte d'Ivoire en 2004 (**Rysunek n°38**).

L'idée était d'étudier les potentiels hydriques et les résistances au flux de sève brute sur tout le trajet sol – plante – atmosphère sur des individus sains et des individus nécrosés pour savoir si la nécrose est associée à un problème d'accès à l'eau ou à un problème de conduite de l'eau.



Rysunek n°46 - Mesures de la résistance stomatique ($r_{\text{stomatique}}$, en $s\ cm^{-1}$) avec un poromètre de type AP4, Delta-T-Devices®.

La station d'étude se trouve au sud de la Côte d'Ivoire (**Rysunek n°39**).

Le climat est celui de la zone forestière humide (**Rysunek n°40**). J'avais choisi le mois de mai comme période de disponibilité en eau non limitante car il correspond à la 1^{re} saison des pluies; et j'avais choisi le mois de septembre comme période de plus faible disponibilité en eau car il correspond statistiquement à la fin de la saison sèche. Mais la 2^e saison des pluies a été précoce et au mois de septembre, la réserve en eau du sol était déjà de nouveau à la capacité au champ.

Les mois de mai et septembre ne se différencient donc pas.

Ici, vue de la station d'étude « P20 » vue de la nacelle (**Rysunek n°41**).



Rysunek n°47 - Mesure du potentiel hydrique du xylème (Ψ_{racines} et Ψ_{tronc} , en bars) avec micro psychromètre Stem Psychrometer, Plant Water Status®

Ici, la même station vue du sol (**Rysunek n°42**).

Pour le choix des individus (**Rysunek n°43**) on a là un histogramme des circonférences du tronc à 1,30 m du sol.

J'ai repris les individus qui avaient été choisis par Daniel NANDRIS dans la catégorie la plus représentée avec une circonférence de 60 à 65 centimètres.

On a choisi des sains et des nécrosés qu'on a associés par couple.



Rysunek n°48 - Mesure du potentiel hydrique du xylème (Ψ_{racines} et Ψ_{tronc} , en bars) avec micro psychromètre Stem Psychrometer, Plant Water Status®

Les deux individus de chaque couple sont voisins - ils ont donc eu des conditions de croissance similaires et seront dans des conditions similaires pour les mesures. On a ici le schéma d'un individu greffé (**Rysunek n°44**)

- le porte greffe qu'on assimile aux racines
- le greffon qu'on assimile au tronc
- la jonction de greffage délimite deux portions de tronc dans la réalité mais ici on considère qu'elle délimite les racines du tronc
- l'endroit des saignées pour la récolte du latex
- le feuillage.

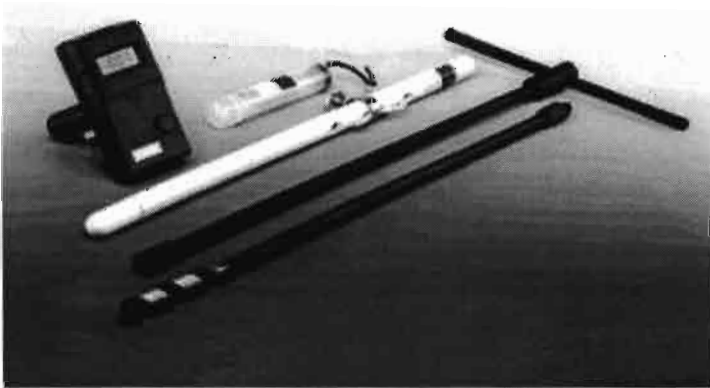


Rysunek n°49 - Mesure du potentiel hydrique du xylème (Ψ_{racines} et Ψ_{tronc} , en bars) avec micro psychromètre Stem Psychrometer, Plant Water Status®

J'ai indiqué les différentes mesures que j'ai faites

- le potentiel hydrique du sol avec un tensiomètre
- le potentiel hydrique du tronc et des racines avec des psychromètres de Dixon
- le potentiel hydrique foliaire avec une chambre à pression
- la résistance stomatique avec un poromètre
- la température foliaire avec un thermo radiomètre
- les variables climatiques que j'ai détaillées ici **Rysunek n°45**, pour l'établissement du bilan radiatif et du calcul de l'évapotranspiration potentielle.

Une photo (**Rysunek n°46**) de la mesure d'une température foliaire.



Rysunek n°50 - Pomiar potencjału wody glebowej (Ψ_{gleba} , bars) avec un tensiomètre de type SMS 2500 - SDEC®.

Ici (**Rysunek n°47**) le dispositif de mesure de la résistance stomatique nécessaire au calcul de la transpiration

- sur des feuilles accessibles du sol, et
- sur des feuilles accessibles avec une nacelle.



Rysunek n°51 – Pomiar potencjału wody glebowej (Ψ_{gleba} , bars) avec un tensiomètre de type SMS 2500 - SDEC®.

Ici (**Rysunek n°48**) l'illustration de la mesure du potentiel hydrique foliaire nécessaire pour le calcul de l'absorption racinaire et du flux de sève.



Rysunek n°52 – Pomiar potencjału wody glebowej (Ψ_{gleba} , bars) avec un tensiomètre de type SMS 2500 - SDEC®.

Ensuite (**Rysunek n°49**) le potentiel hydrique du xylème des racines et du tronc nécessaire pour l'estimation des conductances hydrauliques

- avec l'installation de la sonde psychrométrique,
- il y a ici quatre entailles qui ont servi à évacuer le latex éventuel pour ne pas nuire à l'installation de la sonde,
- le dispositif est fixé à l'arbre par du ruban adhésif et protégé par des matelas isothermes. Les sondes sont installées au nord et les matelas protègent les capteurs des trop grandes variations de température au cours de la journée.

Ici, le microvoltmètre de WESCOR 33-T pour les mesures du potentiel hydrique du xylème (**Rysunek n°50**).

Ici, la préparation de la sonde de Dixon avant l'application au tronc (**Rysunek n°51**).

Enfin (**Rysunek n°52**) le dispositif de mesure du potentiel hydrique du sol avec un tensiomètre et le dispositif de mesure (**Rysunek n°53**) de la teneur en eau du sol avec la sonde TDR.



Rysunek n°53 - Dispositif de mesure de la teneur en eau du sol avec la sonde TDR

Vous avez ici (**Rysunek n°54**) les résultats des mesures du mois de mai

- la 2^e colonne, les individus sains,
- la troisième, les individus nécrosés,
- ici, la différence entre les deux types d'individus,
- là, la différence, significative ou pas.

La disponibilité en eau est la même pour tous, et les potentiels hydriques des racines sont semblables pour les deux types d'individus.

En revanche

- le potentiel hydrique du tronc et
- le potentiel hydrique des feuilles sont plus négatifs pour les nécrosés que pour les individus sains, et
- la résistance stomatique est plus élevée pour les nécrosés que pour les individus sains.

Pour le mois de septembre (**Rysunek n°55**), on se retrouve dans la même configuration qu'au mois de mai, en partie dû au fait que la saison des pluies étant en avance, la réserve en eau du sol était à la capacité au champs comme au mois de mai.

Donc,

- des potentiels hydriques des racines semblables

- des potentiels hydriques du tronc et des feuilles plus négatifs pour les nécrosés que pour les individus sains et ce, associé à
- une résistance stomatique plus élevée pour les nécrosés.

Les potentiels hydriques du sol et des racines rendent compte d'un accès à l'eau identique pour les deux types d'individus, l'absorption n'est pas affectée par la nécrose.

En revanche, au dessus de la jonction de greffage, les individus nécrosés présentent une fermeture partielle des stomates et un état de stress hydrique par rapport aux individus sains.

La greffe poserait donc des problèmes au niveau de l'organisation des tissus conducteurs du xylème.

C'est ce que l'on peut voir ici (**Rysunek n°56**) avec

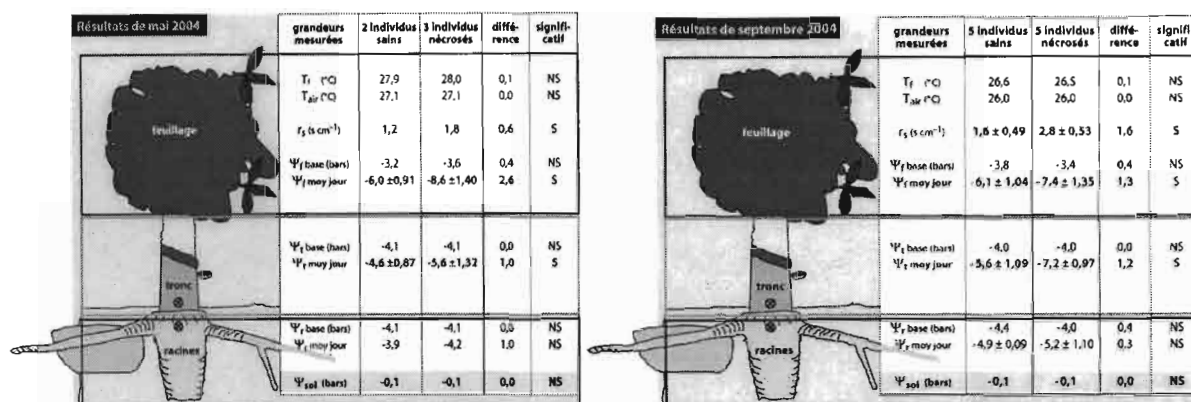
- une transpiration des individus nécrosés inférieure à celle des individus sains
- et en ce qui concerne les conductances hydrauliques
 - (b) la conductance du tronc aux feuilles ne différencie pas les deux types d'individus
 - (c) alors que la conductance des racines jusqu'au tronc ou des racines jusqu'aux feuilles est plus faible dans le cas des individus nécrosés.

La jonction de greffage serait donc à l'origine d'une moindre conduite d'eau à travers le xylème pour les individus nécrosés.

J'ai aussi mesuré les potentiels de base.

Je reviens sur le mois de mai (**Rysunek n°57**) - ils sont semblables pour les deux types d'individus que ce soit au niveau

- les racines: 4,1 et 4,1 bars
- le tronc: 4,1 et 4,1 bars
- les feuilles: 3,2 et 3,6 bars.



Rysunek n°54 - Plantation d'hévéas des individus « sains » (S16-S17-S18) et « nécrosés » (N1-N2-N3) à Bongo, placette d'étude: résistance stomatique ($r_{stomatique}$); potentiel hydrique moyen journalier des feuilles ($\Psi_{feuilles}$); potentiel hydrique moyen du xylème (des troncs et des racines) (Ψ_{tronc} et $\Psi_{racines}$) 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.

La même chose pour le mois de septembre (**Rysunek n°58**)

- les racines: 4,0 et 4,0 bars
- le tronc: 4,0 et 4,0 bars
- les feuilles: 3,8 et 3,4 bars.

Le fait que les potentiels de base soient semblables est dû à une disponibilité en eau que n'était pas limitante.

Ces résultats doivent être complétés par des manips en conditions naturelles et en culture.

En conditions naturelles

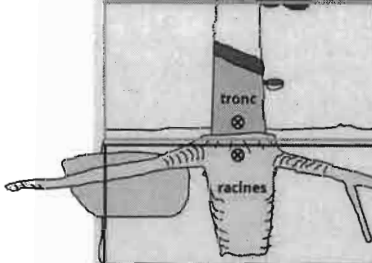
- il faut refaire les mesures en saison sèche pour différentes disponibilités en eau du sol jusqu'à la fin de la saison sèche
- et là, on pourra très certainement obtenir des résultats beaucoup plus contrastés entre individus sains et nécrosés.

Pour des manips en cultures

- on pourrait mettre en place une culture, impliquant deux étudiants en Master
- il y aura vingt individus non greffés et vingt greffés
- quatre niveaux de disponibilité en eau
 - (a) 100 % de la capacité au champ
 - (b) 66 % de la capacité au champ
 - (c) 33 % de la capacité au champ, et
 - (d) 100 % de la capacité au champ, puis en cours de croissance 33 % de la capacité au champ

- tout d'abord, est-ce qu'il y aura convergence entre les individus greffés et les non greffés ?
- ce qui débouche sur la question de savoir si on peut induire la nécrose en culture sur des individus soumis à un stress hydrique
- je fais l'hypothèse suivante

- (a) le greffage induit une vascularisation anormale au niveau de la jonction de greffage
- (b) d'où stress hydrique, quelle que soit la disponibilité en eau et en particuliers si cette disponibilité est faible
- (c) d'où une entrée de Carbone inférieure à celle des individus sains due à une plus grande résistance stomatique
- (d) le compartiment - tissus producteurs de latex - est affecté-la nécrose se met en place.

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

Rysunek n°55 - 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.

Je rappelle que les individus nécrosés ne voient pas leur croissance affectée.

On peut alors faire l'hypothèse suivante pour une étude du métabolisme du Carbone

- le greffage serait à l'origine d'une entrée de Carbone inférieure à celle des individus sains
- avec une incidence sur la production de latex - il y a arrêt de cette production et nécrose
- et une incidence sur la répartition des assimilats en faveur des parties aériennes au détriment des racines, et effectivement

- il semblerait qu'il n'y ait pas de différences de croissance aérienne entre les deux types d'individus, mais
- que la croissance racinaire des individus nécrosés soit moindre
- mais il y a peu d'exemples pour l'instant.

Bardzo Państwu dziękuję za uwagę

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. 2008¹)

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.

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,

¹ 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

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 ;

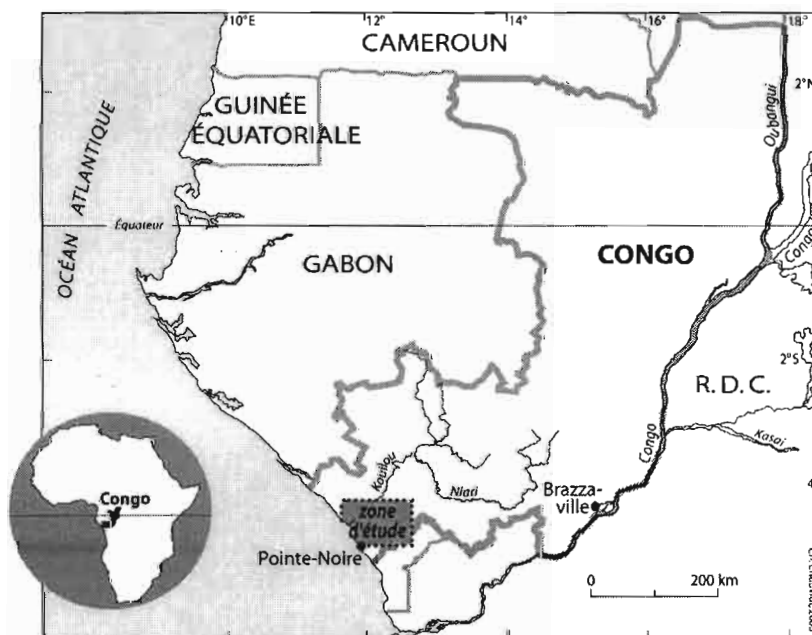


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude: région du Kouilou, sur la façade atlantique de la République du Congo (surface de 13 315 km², située entre le Cabinda au sud et le Gabon au nord); cette région est soumise à un climat tropical humide de type équatorial de transition (climat bas-congolais). 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 $P_{49-98}=1188,4$ 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, $ETP_{SECHE}=3,2$ mm jour⁻¹), une température moyenne de l'air de 24,9°C ($t_{max}=28,2^{\circ}C$, $t_{min}=21,9^{\circ}C$), 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

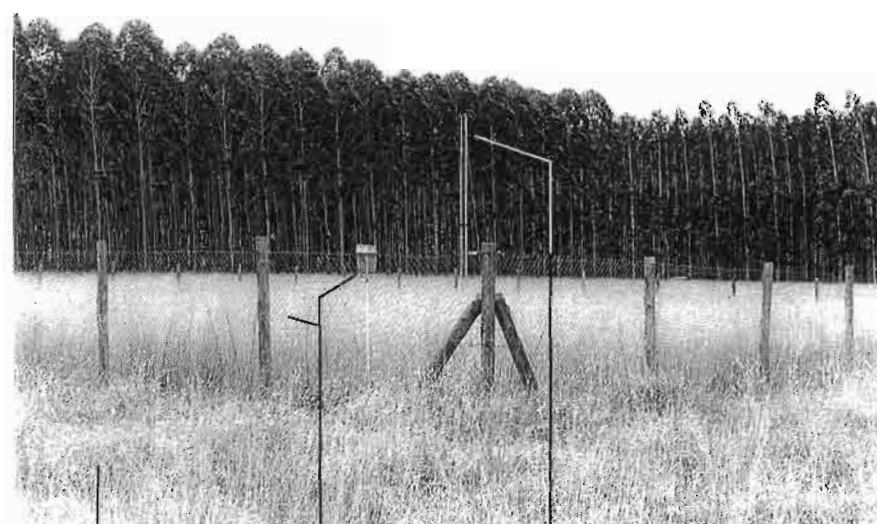
L'expression simplifiée du bilan hydrique du sol d'une savane (photo 1) ou d'une plantation d'Eucalyptus (photo 2) peut s'écrire sous la forme suivante :

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

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

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

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.



pluviomètres (P_i , P_s)
sonde thermique (T_{sol})

anémomètre (v)
bilanmètre (R_n)
pyranomètre (R_g)
sonde psychrométrique ($H\%$, T_{air})

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_{PFP}=181,8 mm; réserve utile R_{RU}=181,2 mm).

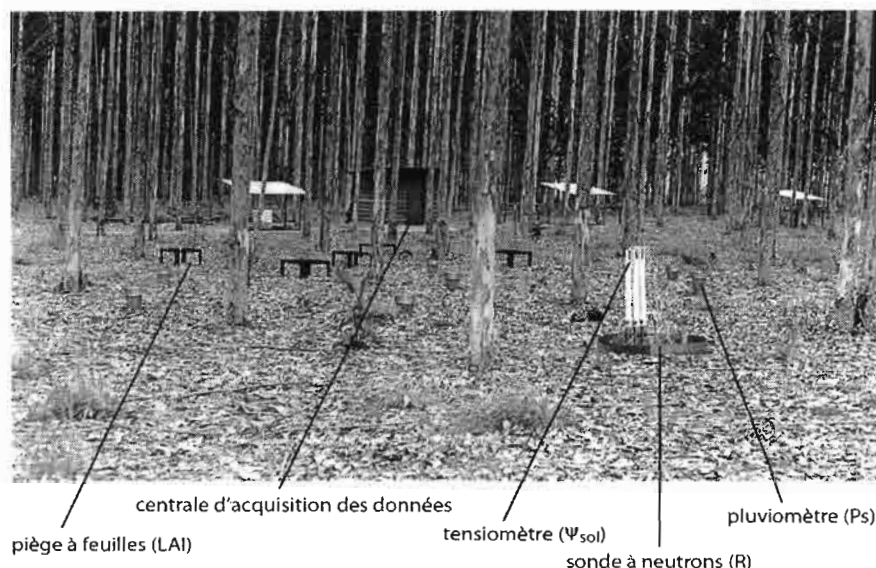


Photo 2 : Vue de la station d'étude n°2: une futaie d'Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna* plantés en janvier 1992 à l'état de plantules issues de boutures, plantules d'environ 0,3 m de hauteur) de cinq ans plantés selon des rangs orientés sud-ouest avec un écartement de 4 m entre 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_{PFP}=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 :

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

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

Avec: ETP - évapotranspiration potentielle en mm jour⁻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
Ces mesures en continu sont stockées sur une centrale d'acquisition de données de type Micrologger 21XL (Campbell)	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 mesures à : 2 m et 5 m 6 m 0,05 m et 0,15 m

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 ($P_{i49-98}=1034,3$ mm): la saison des pluies 1996-97 est déficitaire par rapport à la moyenne ($P_{i96-97}=459$ mm, soit 44 % de P_{i49-98}) ; les précipitations de la saison des pluies 1997-98 ($P_{i97-98}=1338$ mm, soit 129 % de P_{i49-98}) et de celle de 1998-99 ($P_{i98-99}=1140$ mm, soit 110% de P_{i49-98}) sont supérieures à la moyenne. L'ETP est proche de la moyenne 1992-98 ($ETP_{92-98}=1390$ 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	
	<i>Eucalyptus</i>	<i>Savane</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Savane</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Savane</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Savane</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Savane</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Savane</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Savane</i>
Rayonnement net (Rn) 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
Evapotranspiration 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
Ecoulement 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		19,6 0,1 2,0		0,3 0,0 2,0		1,3 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	168,4 1,4	112,2 0,9
Evapotranspiration (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 _{30.04} mm R _{1.11} mm dR = R _{30.04} - R _{1.11} 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	489,4 337,8 238,1 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	225,6 315,9 156,8 275,8 0,9 1,5		0,0 345,3 311,8 33,5 0,0	0,0 298,6 230,2 68,5 0,0	0,0 484,8 380,3 104,5 0,0	0,0 297,8 344,1 -46,3 0,0	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 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*, *Erosema glomeratum*, *Cassia mimosoides*, *Cyanotis*) sont des plantes annuelles qui absorbent et transpirent pendant la saison des pluies, et pendant les mois de transition (mai et octobre), avec un indice foliaire moyen de 2,9 et un maximum de 4,1 en février (Nizinski *et al.* 2002).

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

Le bilan hydrique du sol dépend du type de couvert (par sa structure : étendue, taille, rugosité, présence ou absence des feuilles, pigmentations, *etc*), le type de couvert conditionnant le bilan radiatif et énergétique Rn – voir équation [7]): la quantité de rayonnement solaire absorbée par les surfaces (dépendant de l'albédo) est dissipée, pour l'essentiel, dans l'air environnant sous forme de chaleur latente (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 ($a_{\text{EUCALPTUS}}=0,13$ 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 recoupent celles de Beadle *et al.* (1995): en conditions hydriques non limitantes, la résistance stomatique minimale moyenne d'un couvert d'Eucalyptus (valeurs moyennes annuelles de plusieurs peuplements) est de 5,9 m s⁻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).

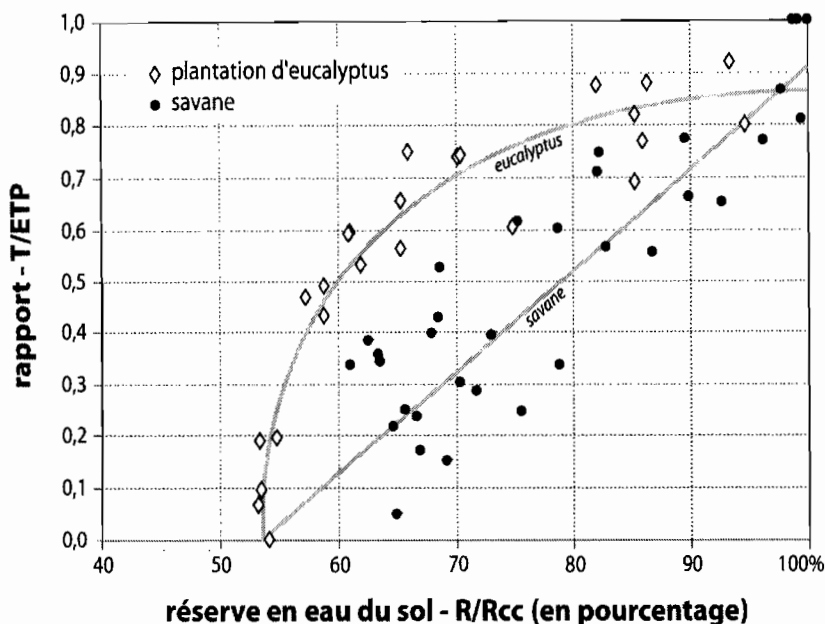


Figure 2 : Relation entre la transpiration relative du peuplement transpiration/évapotranspiration potentielle, T/ETP) et la réserve en eau du sol (valeurs moyennes mensuelles du 17 février 1997 au 26 juillet 1999: (a) plantation d'Eucalyptus (*Eucalyptus PF1* et *Eucalyptus 12ABL*saligna*); (b) savane 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*, $P_i=1670$ mm an⁻¹). Calder (1986) a étudié des peuplements d'*Eucalyptus saligna* âgés de 6 ans, au Brésil ($P_i=1280$ 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 $R_{CC}=363$ 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 RPFP), les valeurs les plus faibles observées pour la savane vont de 0,19 à 0,25. Et quelle que soit la réserve en eau du sol, pour une valeur donnée de cette réserve en eau du sol, la transpiration relative de la plantation est toujours supérieure à celle de la savane. On pourra qualifier le type de régulation stomatique de la plantation comme « peu marqué ». Lors de la saison des pluies des trois années étudiées, la plantation a évapotranspiré en moyenne 767 mm d'eau, soit une ETR moyenne journalière de 4,2 mm jour⁻¹. Dye (1987) donne une valeur d'ETR de 4,7 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 ($P_i=1250$ 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 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 m². 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 calculée 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 ($P_{196-97}=459$ mm, soit 44% de P_{150-98}) 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 ($P_{196-97}=459$ mm), à laquelle il faut ajouter 281 mm d'eau qui ont donc été prélevés dans la zone racinaire (de 5 m de profondeur), desséchant ainsi la zone racinaire vers la fin de la saison sèche 1997 (septembre) jusqu'au point de flétrissement permanent (52% de la réserve totale). L'analyse des profils hydriques rend bien compte de ces phénomènes. Dans le même temps, la savane a évapotranspiré 473 mm, ce qui correspond à seulement 14 mm prélevés dans la zone racinaire, à opposer aux 281 mm prélevés dans le cas de la plantation. A la fin de la saison sèche, le sol est au point de flétrissement permanent dans la plantation alors que dans la savane, il subsiste dans le sol une quantité d'eau qui représente 15% de R_{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 $P_{158}=296,0$ mm an⁻¹ à $P_{160}=2045,3$ 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. BIOCLIMATOLOGICAL ANALYSIS OF THE BARK NECROTIC RUBBER TREE IN CÔTE D'IVOIRE PLANTATIONS (Nizinski et al. 2011²)

² 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, 37(1), 58-67

FORESTRY

Bioclimatological Analysis of the Bark Necrotic Rubber Tree in Côte d'Ivoire Plantations¹

J. J. Nizinski, G. Galat, and A. Galat-Luong

Institut de Recherche pour le Développement, I.R.D., UMR 211 "BIOEMCO—Biogéochimie et Écologie des Milieux Continentaux—Interactions Biologiques Dans les Sols," Centre d'Ile de France, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

e-mail: georges.nizinski@ird.fr

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. 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 ± 0.1 cm³ H₂O s⁻¹ bars⁻¹) and "necrosed" trees (0.2 ± 0.1 cm³ H₂O s⁻¹ bars⁻¹); on the other hand, concerning the resistances between the roots and the trunk the two types of trees differentiate radically: 0.2 ± 0.1 cm³ H₂O s⁻¹ bars⁻¹ for "healthy" trees and 1.1 ± 0.3 cm³ H₂O s⁻¹ 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

DOI: 10.3103/S1068367411010150

INTRODUCTION

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 [1]; even in the very severe case of attacks, the cambium and the xylem remain functional. Taking into account the continuous differentiation by cells of the cambium, the layer of laticiferous nonfunctional, necrotic tissues, is pushed back towards the outside. This disease touches primarily adult trees in the course of tapping which then do not produce any more latex but cases of bark necrosis were noticed in untapped young rubber tree plantations (an irreversible syndrome); it is not a question of tapping panel dryness (a reversible physiological response to overexploitation).

Many observations suggest that the development of cortical necrosis is started, or accelerated, by a combination of environmental factors (stress linked to the climate and the soil) and of tapping (mechanical and/or metabolic stress). One can also suppose a genetic contribution of clonal variability (obvious in

the case of the tapping panel dryness, less evident for bark necrosis).

According to the quantitative observations of Nizinski *et al.* [2], it appears to justify the assumption of the association of necrosis with the stomates partial closure and more negative xylem water potential of the "necrosed" trees, indicating a problem of water absorption (roots) or of sap transfer (xylem).

We studied the water transfers in rubber tree plantations in Côte d'Ivoire by considering the soil, the rubber trees and the atmosphere like a physical entity in which processes implemented for the circulation of water are interdependent. We measured the water potentials and resistances to the sap transfer at the level of the roots, of the stem and of the leaves in "healthy" and "necrosed" trees.

MATERIALS, METHODS AND STUDY SITES

Local climate, study sites and vegetation: the study plot is in the south of the Côte d'Ivoire (Fig. 1); the climate there is representative of the general climate of the tropical rain forest area, with mean annual rainfall $P_i = 2065$ mm year⁻¹, potential evapotranspiration

¹The article is published in the original.

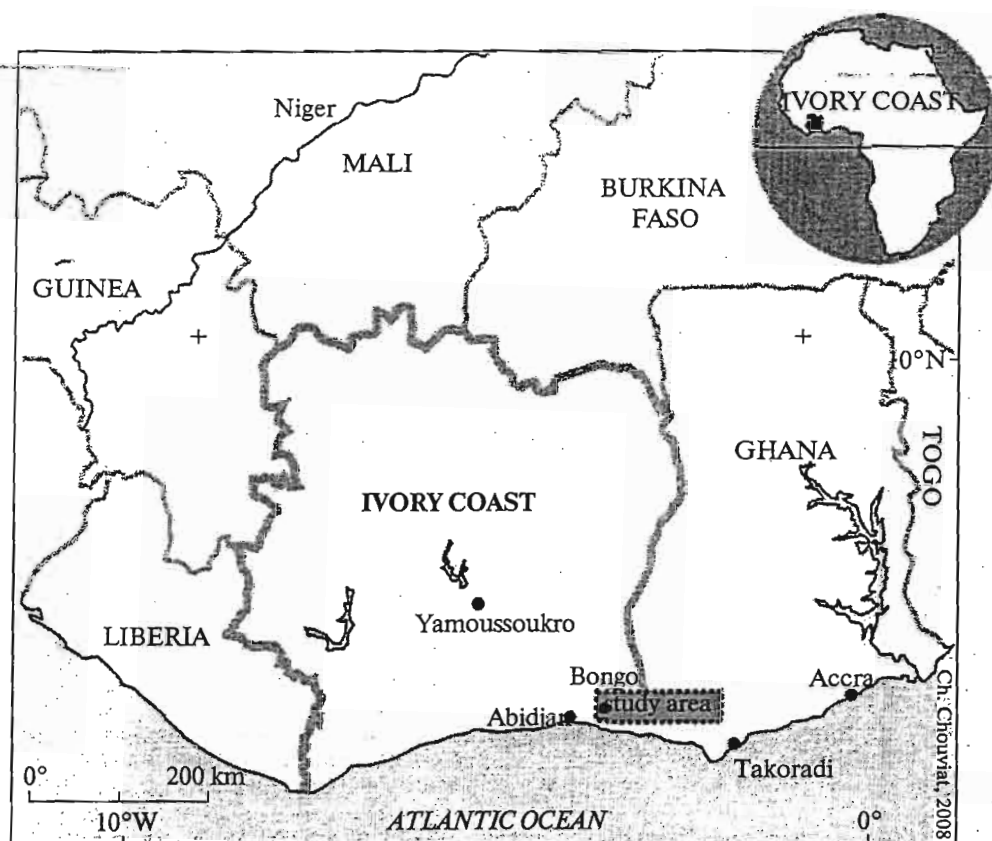


Fig. 1. Situation of the study area: the Bongo rubber tree plantation (covered 50 ha) on the Atlantic Ocean front of the Ivory Coast between Ghana and Liberia.

[3], $E_p = 1365 \text{ mm year}^{-1}$ ($E_p = 3.7 \text{ mm day}^{-1}$), mean daily global radiation is 18.4 MJ day^{-1} , mean duration of insolation is 6.3 hours, mean air temperature is 26.3°C ($t_{\max} = 28.8^\circ\text{C}$, $t_{\min} = 23.7^\circ\text{C}$), relative air humidity is 87.3%, mean wind speed is 95.8 km day^{-1} (meteorological station of Abidjan, located about 80 km South–West of the study plot: latitude $5^\circ 15' \text{N}$, longitude $3^\circ 56' \text{W}$; altitude 125 m above sea level; www.fao.org) (Fig. 2). The period from April to June corresponds to the great rainy season ($P_i = 712 \text{ mm}$; with mean annual rainfall $P_i = 1723 \text{ mm year}^{-1}$; meteorological station of Bongo located in the study site). We made measurements on the one hand during this rainy season, in May 2004 ($P_i = 146 \text{ mm month}^{-1}$; with soil water content at field capacity) and on the other hand in September which statistically corresponds to the end of the dry season, with July ($P_i = 175 \text{ mm month}^{-1}$)–August ($P_i = 68 \text{ mm month}^{-1}$)–September ($P_i = 87 \text{ mm month}^{-1}$); but in 2004 the 2nd rainy season was early and during measurements in September the rains had already brought back the soil water content at field capacity; thus our two periods of measurements do not differ concerning the availability of water for the rubber trees, which here is optimal.

The zone of study is in a coastal sedimentary basin (Pliocene) comprising clayey sandstones, sands and

clays. The soils are ferrallitic soils, sandy soils, permeable on the surface, poor in mineral elements because of the desaturation in the base absorbing complex from the A and B layers, acids ($\text{pH} < 6.0$).

The stems and the leaves of the rubber tree contain specialized tubes that secrete latex, milky liquid substance coming from laticiferous cells distributed on the cortex level and directed vertically, and which have a length of several meters [4]. The refoliation, associated with an elongation of the stems is done immediately after the leaves fall. The rubber tree is of recent introduction in Côte d'Ivoire. The studied clone, PB 260, was created between 1955 and 1960 in Malaysia by pollination and was classified like latex and timber clone with a right and regular trunk, having a fast growth before tapping (5 years). The cultivated trees are grafted; there thus exists “a junction of grafting” on these trees.

Transpiration of a plantation and transpiration of a “healthy” and a “necrosed” tree: the potential evapotranspiration (E_p) was calculated by Penman's [3] formula using the meteorological data from the meteorological station located about 5 km from the study plot; values of the E_p were calculated for each twenty minutes and also for longer periods corre-

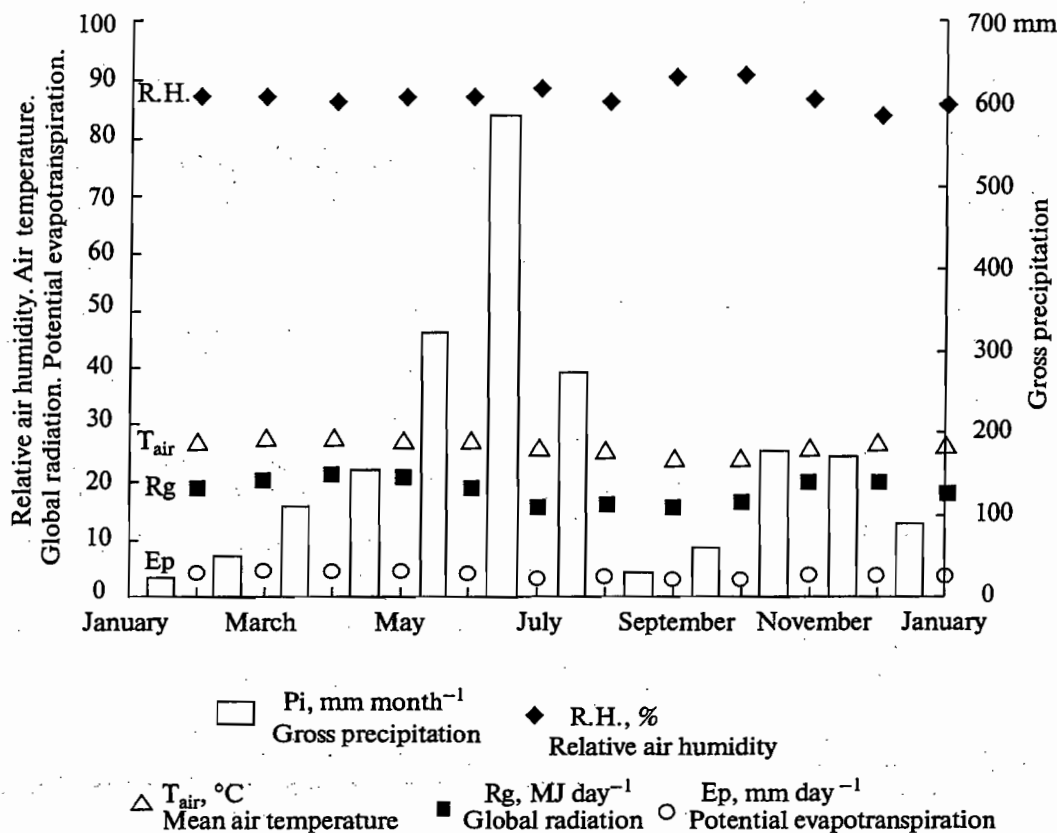


Fig. 2. Meteorological data: gross precipitation, mean air temperature, air humidity, potential evapotranspiration and global radiation. These data come from the airport meteorological station of Abidjan, located about 80 km South-West of the study plot (latitude 5°15'N, longitude 3°56'W, altitude 125 m above sea level).

sponding to the intervals between the measurements of the potentials and the resistances of "healthy" and "necrosed" trees

$$E_p = (\Delta Rn / \lambda + \gamma E_0) / (\Delta + \gamma).$$

For this study, Monteith's [5, 6] method was adopted, where the evaporative surface was considered as a single layer in which the mean stomatal resistance of the canopy is equal to the sum of the stomatal resistance of all the leaves. Thus the evapotranspiration (E_a) rate from a plantation canopy can be quantitatively expressed as follows

$$E_a = E_p / 1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_{s(\text{mean})} / \text{LAI}_{P20} r_a).$$

with E_p being potential evapotranspiration (mm day^{-1}); Rn is global radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$); λ is latent heat of vaporisation (2.45 MJ kg^{-1}); γ is psychrometer constant ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Δ is the slope of the curve relating saturation vapour pressure to temperature ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); E_0 is free water evaporation (mm day^{-1}); E_a is actual evapotranspiration (mm day^{-1}); $r_{s(\text{mean})}$ is mean leaf stomatal resistance (measured; s cm^{-1}); LAI_{P20} is leaf area index ($\text{LAI} = 3.2$); r_a is aerodynamic resistance: $r_a = (1 / (k^2 u_{2M})) (\ln(z - d) / z_0)^2$ (s cm^{-1}), with k is von Kar-

man constant (0.39); u_{2M} is wind speed (m s^{-1}); z is height above ground (m); z_0 is roughness height (m); d is zero plane displacement height (m); with $d = 0.75h$ and $z_0 = 0.1h$, where h is mean vegetation height (m) (Thom, 1972).

$$\text{Tr} = \sum \text{Tr}_{(i)} S_{(i)} / N / 3 \text{ with } \text{Tr}_{(i)} = E_p / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_{s(\text{mean})} / \text{LAI}_{P20} r_a)).$$

And $S_{(i)} = S_{P20} / N_{P20}$ with $S_{P20} = 30.03 \text{ m}^2 \text{tree}^{-1}$ (table)

with $\text{Tr}_{(i)}$ is transpiration of an individual tree (i) within a study plot P20 (mm day^{-1}); $r_{s(\text{mean})}$ is mean leaf stomatal resistance of an individual tree (i) (s cm^{-1}); $S_{(i)}$ is surface of the soil occupied by an individual tree (i) within a study plot (m^2); S_{P20} is surface of the study plot P20 ($P20 = 257000 \text{ m}^2$) (m^2); N_{P20} is number of the trees on study plot P20 ($N_{P20} = 8558$ trees); 3 is number of measures per hour (3×20 minutes); i is name of the individual tree, a "healthy" (H17, H16, H18) and a "necrosed" (N1, N2, N3) tree.

Hydraulic conductance of a stem: water flow through stems conforms to Darcy's law where volume flow rate is a function of the hydraulic conductance and the pressure difference between the ends of the

flow path [7]: $k_h = Tr_{(i)} / (\Delta\Psi/l)$, with k_h is hydraulic conductance of a stem ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1} \text{bars}^{-1} \text{m}^{-1}$) (conductance = $1/\text{résistance}$; $k_h = 1/r_{\text{root-stem}}$); $Tr_{(i)}$ is transpiration of an individual tree (i) ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1}$); $\Delta\Psi$ is the pressure gradient between the ends of the flow path (bars); l is the stem length (m).

We suppose a continuity of water between the roots and the stomatal cavities; the transpiration of a leaf is proportional to the difference between soil and leaf water potential, and inversely proportional with resistances (opposite of the conductances) existing on the path soil-roots-stem-stomatal cavities. Measurements of water potentials enable us to appreciate resistances along the continuum roots-stem-leaves.

In this study the water uptake by roots is equal to transpiration (conservation of water flow from soil to the stomatal cavities) and water flow through all the roots, the stem, all the branches, all the leaves (liquid water flow) and the water vapour through the stomata into the air (water vapour phase) are equal and make up the transpiration flow (Photo 2a, 2b and 2c) [8]:

$$\text{Abs} = (\Psi_{\text{soil}} - \Psi_{\text{root}}) / r_{\text{soil-root}} = (\Psi_{\text{root}} - \Psi_{\text{stem}}) / r_{\text{soil-stem}} \\ = (\Psi_{\text{stem}} - \Psi_{\text{leaf}}) / r_{\text{soil-leaf}} = Tr_{(i)}.$$

By simplification, we will use the following compartments: the compartment "leaves", the compartment "stem" which is the graft, the compartment "roots" which is the rootstock; in our schema of compartments, the junction of grafting delimits the compartment "roots" and the compartment "stem", thus: Abs is water uptake by roots ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O tree}^{-1} \text{s}^{-1}$); Ψ_{soil} is soil water potential (bars); Ψ_{root} is root's xylem (rootstock) potential (bars); Ψ_{stem} is stem's xylem (graft) potential (bars); Ψ_{leaf} is leaves' water potential (bars); Tr is water flow through stem (transpiration of a tree) ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O tree}^{-1} \text{s}^{-1}$); $r_{\text{soil-root}}$ is hydraulic resistance of the plant to waterflow, from soil to root xylem ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O s}^{-1} \text{bars}^{-1}$); $r_{\text{root-stem}}$ is hydraulic resistance of the plant to waterflow, from root's xylem (rootstock) to stem's xylem (graft) through grafting junction ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O tree}^{-1} \text{s}^{-1} \text{bars}^{-1}$); $r_{\text{stem-leaf}}$ is hydraulic resistance of the plant to waterflow along the stem's xylem (graft) pathway from grafting junction to leaves ($\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O tree}^{-1} \text{s}^{-1} \text{bars}^{-1}$).

Sampling and measurement technique: Nandris et al. [1] chose in September 2003 the measurement of transpiration, potentials and resistances, of the "healthy" and "necrosed" trees (table; photo 1), which they associated by couple ("healthy" tree called H; "necrosed" tree called N); the two trees of each couple are close one to the other, had similar conditions of growth and are, at the moment of measurements, under similar conditions (light, shade): there are three couples (H-N) within the studied plot (photo 1). We followed, on these trees, the daily kinetics of stomatal resistance, the leaves' potential, the stem's xylem potential, the root's xylem (rootstock) potential and the corresponding pre dawn potentials.

Morphological characteristics of the rubber tree plantation of the study plot P20

Date of planting	1996
Clone	PB-260
Spacing, m	6 × 4.0
Mean height of trees, m	15.0
Surface of the study plot, ha	25.70
Number of the trees	8558
Stand density, trees ha ⁻¹	333
Surface occupied by an individual tree, m ²	30.03
Mean stem circumference at 1.3 m level, cm	59.57
Mean stem diameter at 1.3 m level, cm	18.96
Total basal area, m ² ha ⁻¹	10.00
Leaf area index (LAI), m ² m ⁻²	3.24

We had used in 2003 in Ghana (Aboura) a simple and direct method to have a first outline of water transfers in the rubber tree [9]: trees, both "healthy" and "necrosed", were selected. We took for each tree, a section of stem (block) of a thickness of approximately 8 cm, including the junction of grafting which was immediately placed in a solution of Phoxine B® at $0.5 \text{ cm}^3 \text{dm}^{-3}$. This red stain migrates in the functional conducting vessels and reached the other end in a few minutes, by delimiting in a quite visible way the conducting zones. The comparison of the surfaces "spotted" by Phoxine B® allowed the first qualitative discrimination of the sap flux resistances through the grafting junction.

The leaves are the place of the mass and energy exchanges between the canopy plantation and atmosphere: we account for the surface of the leaves and their distribution by the leaf area index. We assimilated the number and the total leaf surface present on the tree before the fall of the leaves, with the number and the total surface of the leaves constituting the fresh litter, after the leaves fall [10]. We used the method of "the needle" [2] which consists in posting the number of leaves of the year (fresh litter) collected using a needle, used perpendicular to the soil surface, each measurement being repeated 300 times.

Soil water balance, plant water status and environmental measurements [9]:

Daily measurements, gross precipitation (one rain gauge; collecting area 400 cm^2), soil water content (five permanent access tubes; TDR probe, SDEC®, France).

Hourly measurements, stem's xylem (graft) potential and root's xylem (rootstock) potential (twenty stem psychrometers; Plant Water Status Instruments®, Guelph, Canada; [11] recorded on a dew point micro voltmeter Wescor HR-33T®, Logan, Utah, USA), leaf water potential (pressure chamber PMS®, Corvallis, Oregon, USA), leaf transpiration, stomatal resistance, Photosynthetically Active Radiation (PAR) (porome-

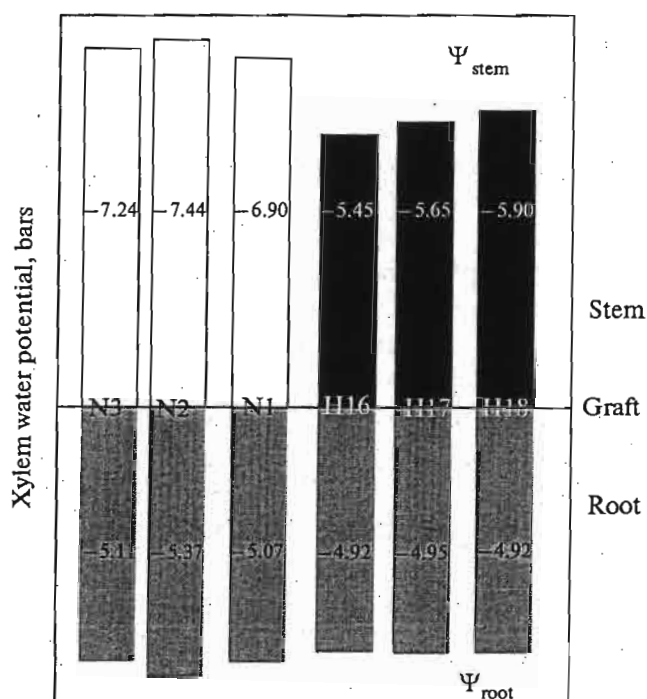


Fig. 3. Rubber tree plantation in Bongo, study plot—mean daily xylem water potential of stem and root (Ψ_{stem} and Ψ_{root}) of the “healthy” (H16–H17–H18) and of “necrosed” trees (N1–N2–N3) during the period from 11 to 22 May and from 5 to 18 September 2004.

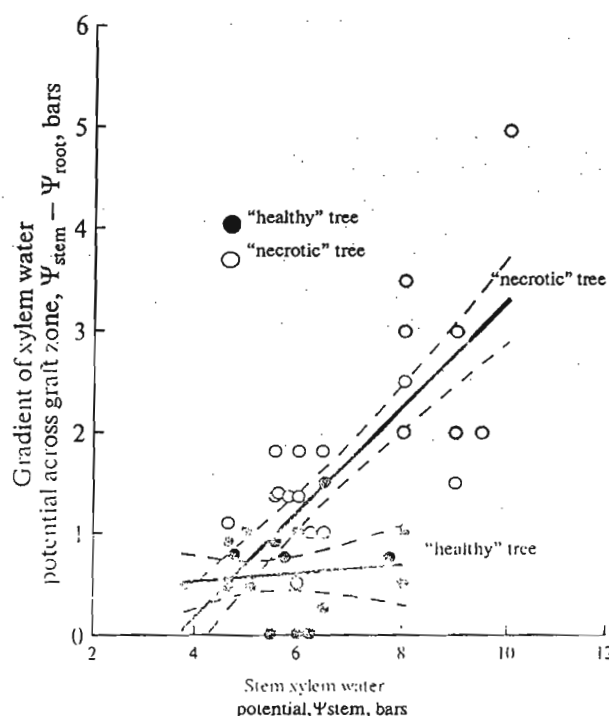


Fig. 4. Relationship between gradient of the xylem water potential across graft zone ($\Psi_{\text{root}} - \Psi_{\text{stem}}$) and the stem water potential (Ψ_{stem}) of the “healthy” and “necrosed” trees.

ter AP4, Delta-T-Devices®, UK), soil-water potential (four tensiometers SMS 2500, SDEC®, France), leaf and air temperature (radio thermometer DTMX de Raytek®, UK; measurement error $\pm 0.3^\circ\text{C}$).

Twenty-minute interval measurements (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).

Daily meteorological data, gross precipitation, mean air temperature, dew point temperature, air humidity, total air pressure, insolation and wind speed. These data come from the airport meteorological station of Abidjan, located about 80 km South–West of the study plot (latitude $5^\circ 15' \text{N}$, longitude $3^\circ 56' \text{W}$; altitude 125 m above sea level).

RESULTS AND DISCUSSION

Parameters of the Soil and the Rubber Tree Plantation

To compare our measurements with those of other work, we parameterized the study plot, these parameters are entered into the models of the transpiration of the “healthy” and “necrosed” trees (table): the stand density, the mean stem circumference, the total basal area, the leaf area index, the mean height of a rubber tree, the area occupied by an individual tree (photo 1), these parameters are close to those obtained by Monteny [12].

The soil water content and potential profiles were established each day of measurement on a 1.2 m depth, depth corresponding to the near total of the rubber tree roots system (which can reach 4.0 m depth). These profiles were established respectively for the “healthy” and “necrosed” trees: these profiles have the vertical and horizontal usual variability of a plantation; we could estimate that the available soil water content for the two types of trees is the same. For the whole of the roots zone the soil water contents were always close to the soil water content at the field capacity, $R_{FC} = 412 \text{ mm}$, that is to say a soil water potential of $\Psi_{\text{soil}} = -0.1 \text{ bars}$ and are comparable with the values mentioned by Monteny [12] concerning ferrallitic soils related with ours (formed on sand, in Oursou, Côte d'Ivoire) and planted with the rubber trees.

For each leaf, we have the daily dynamics of the leaf temperature, air temperature and difference in temperature between the leaf and the air. The leaf temperatures of the “healthy” and “necrosed” trees are not different, recorded differences in temperature (0.1°C)

are lower than the precision of the radio thermometer (minimal difference of 0.3°C): we obtained 27.9 and 28.0°C as well in May ($T_{\text{air}} = 26.0^{\circ}\text{C}$) as in September ($T_{\text{air}} = 27.1^{\circ}\text{C}$). These measurements were made in the rainy season, with a maximum cloud cover and with a minimal temperature which explains the absence of difference in leaf temperature between the two types of trees. It was not the case in Ghana [9] where the conditions of water availability of the soil were not optimal and the daily variations of vapour pressure deficit were very pronounced.

Water Flux, Potentials and the Resistances in the Soil–Plant–Atmosphere System

Potential evapotranspiration and transpiration of “healthy” and “necrosed” trees: morphological characteristics of the plantation being identical for the two types of trees, the potential evapotranspiration is the same for the whole the plantation, it represents maximum energy being able to be dissipated in the form of latent heat of vaporization. The potential evapotranspiration of the rubber tree plantation, mean daily value over 18 days, from 5 to 13 May and from 7 to 25 September 2004, assessed with the equation of Penman [3] is of 3.6 mm day^{-1} , value comparable with that mentioned by Monteny [12] for the same area (3.5 mm day^{-1}). The potential evapotranspiration follows the variations of global radiation above cover. For a well irrigated and tightly planted plantation, the sensible heat will be almost non-existent; the energy received on the soil surface is used in the latent heat of vaporization. The maximum potential evapotranspiration is between 12:00 and 15:00 with values included between 13500 and $15600 \text{ cm}^3 \text{ tree}^{-1} \text{ h}^{-1}$, when the net radiation is most important, the highest temperature of the air (until 37°C), the maximal vapor for pressure deficit and the minimal relative air humidity (63%).

The maximum values of transpiration are obtained towards 14:00. Maximum average transpiration for the three “healthy” trees is respectively 12500 , 12000 and $11500 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O tree}^{-1} \text{ h}^{-1}$, that is to say an average of $12100 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O tree}^{-1} \text{ h}^{-1}$. The relative discrepancy between trees is 16.4% with a standard error of 0.6 for one hour step time resolution. Maximum average transpiration for the three “necrosed” trees is respectively 10300 , 9000 and $11800 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O tree}^{-1} \text{ h}^{-1}$, that is to say an average of $10400 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O tree}^{-1} \text{ h}^{-1}$. The relative discrepancy between trees is 10.7% with a standard error of 0.6 for one hour step. The maximum difference between “healthy” and “necrosed” trees which are located at 14:00 and are of $1700 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O tree}^{-1} \text{ h}^{-1}$. The transpiration of the “necrosed” trees is lower than that of the “healthy” trees whatever the time resolution measurement (20 minutes, one hour, and one day) enabling us to conclude that a water stress is imposed on these “necrosed” trees. The average values over eighteen days of instantaneous transpiration are: $1.9 (\pm 0.11; \text{“healthy” tree})$ and 1.4

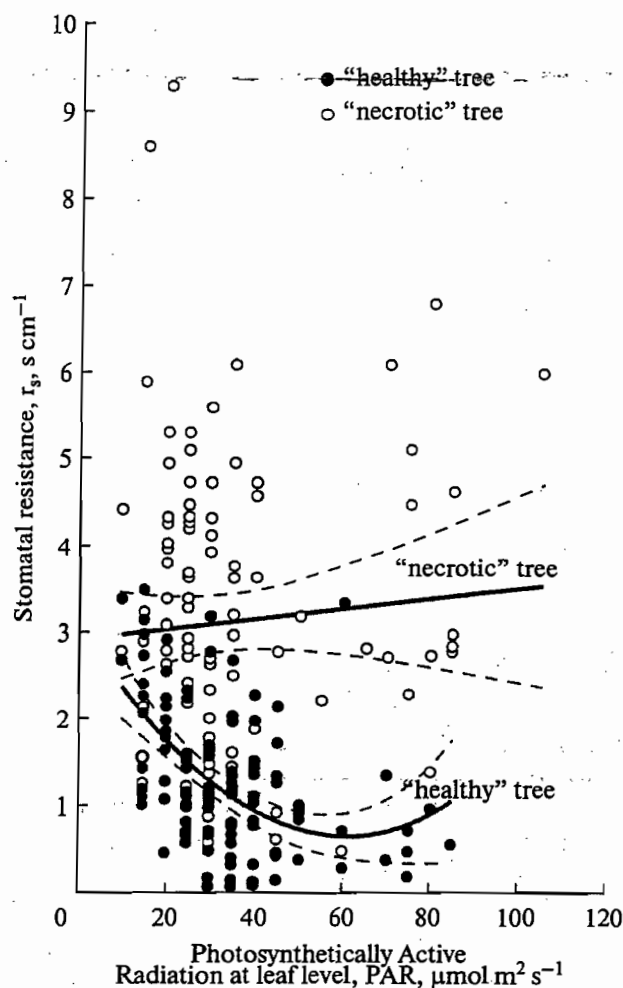


Fig. 5. Relationship between leaf stomatal resistance (r_s , s cm^{-1}) and Photosynthetically Active Radiation (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) at leaf level.

(± 0.31 ; “necrosed” tree) $\text{cm}^3 \text{ H}_2\text{O tree}^{-1} \text{ s}^{-1}$, that is to say a transpiration of the “necrosed” trees lower by 30% than that of the “healthy” trees ($0.5 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O tree}^{-1} \text{ s}^{-1}$). The mean daily transpiration was respectively for the “healthy” and the “necrosed” trees of 2.7 mm day^{-1} and 2.3 mm day^{-1} (17500 and $13500 \text{ cm}^3 \text{ tree}^{-1} \text{ day}^{-1}$) [9].

Potentials, stomatal resistance and sap flux resistance in the “healthy” and “necrosed” trees: the results appear in Fig. 3.

• *Pre dawn potential* accounts for the balance of the soil water potential—potential of the measured compartments (leaves, stem, roots) which is established during the night, period without transpiration; this potential tends, without necessarily reaching it, towards the soil water potential, here with the soil water content at the field capacity for the two periods of measurements [13]. Averages of the pre dawn leaf potentials, are respectively for the “healthy” and “necrosed” trees $\Psi_{\text{leaf}} = -3.2$ and -3.6 bars in May, and $\Psi_{\text{leaf}} = -3.8$ and -3.4 bars in September. Precision



Photo 1. General sight of the study plot—P20: mature rubber tree plantation (clone PB 260) were planted in January 1996 with transplants (0.3 m height) in pits dug at a spacing of 4 m × 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.

of the measuring device being of ± 0.5 bars, there is no difference between “healthy” and “necrosed” tree. As for the leaves, averages of the pre dawn potential of the xylem of the “healthy” tree do not differentiate from the “necrosed” tree, whether it be for the stem or for the roots either in May or in September: $-4.1/-4.1$ bars.

- Average daily *water leaf potential*, is respectively, for the “healthy” and “necrosed” trees, $\Psi_{\text{leaf}} = -6.0 (\pm 0.9)$ and $-8.6 (\pm 1.4)$ bars in May, and $\Psi_{\text{leaf}} = -6.1 (\pm 1.0)$ and $-7.4 (\pm 1.3)$ bars in September. The foliar potential of the “necrosed” trees is lower than that of “healthy” trees by approximately 2.0 bars. We will compare these values with those measured, respectively for “healthy” and “necrosed” tree, in Côte d’Ivoire (March 26, 2003): $\Psi_{\text{leaf}} = -3.5$ and -4.8 bars; in Nigeria (April 1, 2003) study site n°1: $\Psi_{\text{leaf}} = -4.7$ and -5.4 bars; study site n°2: $\Psi_{\text{leaf}} = -8.8$ and -11.7 bars; in Cameroon (April 7, 2003) study site n°1: $\Psi_{\text{leaf}} = -4.5$ and -5.3 bars; study site n°2: $\Psi_{\text{leaf}} = -9.1$ and -10.4 bars [1].

The daily average of the *xylem potential* is respectively, for the “healthy” and “necrosed” trees (Fig. 3); 1°) for the *roots* $\Psi_{\text{root}} = -3.9$ bars and -4.2 bars in May and $\Psi_{\text{root}} = -4.9 (\pm 0.1)$ and $-5.2 (\pm 1.1)$ bars in September; 2°) for the *stems* $\Psi_{\text{stem}} = -4.6 (\pm 0.9)$ and $-5.6 (\pm 1.3)$ bars in May and $\Psi_{\text{stem}} = -5.6 (\pm 1.1)$ and $-7.2 (\pm 1.0)$ bars in September. The xylem potential of the “necrosed” tree is lower than that of the “healthy” tree by approximately 0.5 bars for the roots and by approximately 1.5 bars for the stems [14]. In Fig. 5, the gradient of water potential between the roots and the stem,

therefore through the junction of grafting, is expressed according to the water potential of the stem; the “healthy” and “necrosed” trees are different clearly in both populations. For the “healthy” trees, the gradient of potential through the junction of grafting can be supposed constant whatever the stem potential, thus expressing a situation of good water availability. For the “necrosed” trees, the schema gives an account of a water stress situation below -5 bars (here ranging between -5 and -10 bars). The gradient of water potential through the junction of grafting is then 1st) higher than in the case of the “healthy” trees and 2nd) for water potential of the trunk of approximately -10.0 bars, up to ten times superior to that of the “healthy” trees. This type of schema that we have here for the “necrosed” trees could well be found in “healthy” trees subjected to a water stress, with a threshold increase in the gradient of potentials through the junction of grafting and a dynamic curve (gradient = $f(\Psi)$) appropriate to each “healthy” trees.

- * Measurements were made in the rainy season, under optimum conditions for availability of water, thus, the measured *stomatal resistances* are minimal stomatal resistances. Figure 4 accounts for measured minimal stomatal resistances, expressed here according to Photosynthetically Active Radiation (PAR): two distinct populations of points are obtained, the “necrosed” trees clearly are different from the “healthy” trees: whereas the minimal stomatal resistance of the “healthy” trees decreases with the increase of the PAR, that of the “necrosed” trees

remains almost constant and it is overall higher than that of the “healthy” trees. This schema reveals that the water status of the “necrosed” trees is here a more limiting factor than the PAR. Thus, the mean daily minimal stomatal resistance is respectively for the “healthy” and the “necrosed” trees $r_{s(\text{mean})} = 1.2$ and 1.8 s cm^{-1} in May and $1.6 (\pm 0.5)$ and $2.8 (\pm 0.5) \text{ s cm}^{-1}$ in September. Minimal stomatal resistances of the “necrosed” trees are higher than those of the “healthy” trees by approximately 1.0 s cm^{-1} , and they are associated with more negative leaf and xylem potentials than those of the “healthy” trees, and with a transpiration lower than that of the “healthy” trees suggesting the induction of water stress for the “necrosed” trees.

Sap flux resistances: we will start by recalling the results of measurements made in Ghana (Nizinski et al., 2008a) with Phoxine B®: the first spots appear at the end of 20 seconds approximately on a “healthy” tree and at the end of one minute approximately on a “necrosed” tree; in addition, the “stained” surface of the “healthy” tree is higher than that of the “necrosed” tree (photo 3a and 3b). The transfer of Phoxine B®, therefore of sap, is faster on the “healthy” tree than on the “necrosed” tree.

The resistances to the sap crossing through the stem 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 for “necrosed” trees ($0.2 \pm 0.1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$); the resistances to the sap crossing through the roots and the stem radically differentiate on the other hand the two types of trees: $0.2 \pm 0.1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$ for the “healthy” trees and $1.1 \pm 0.3 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$ for the “necrosed” trees, phenomenon which one finds if the analysis is made of this resistance, from the compartment “roots” to the compartment “leaves” (Fig. 3). It is thus on the level of the junction of grafting that resistance is exceptionally high for the “necrosed” trees, knowing in addition that in ligneous species, xylem resistances are not limiting concerning the circulation of water (resistances are lower than the leaf level). Thus this high resistance to the sap flow on the level of the junction of grafting in the “necrosed” trees induced a water stress at these trees: xylem water potential—stem and leaf water potential more negative than in the “healthy” trees, lower transpiration than in the “healthy” trees.

The pre dawn potentials, leaf water potentials, xylem water potential of stem and xylem water potential of roots, similar for the “healthy” and the “necrosed” trees, are explained by the choice of the periods of measurement: under optimum conditions for water availability the rebalancing of the potentials soil—tree is optimal here since, in spite of a high resistance to the sap crossing through the grafting junction in the “necrosed” trees, the duration of the night is sufficient so that the rebalancing of the potentials is done in the same way for the “healthy” and “necrosed” trees.

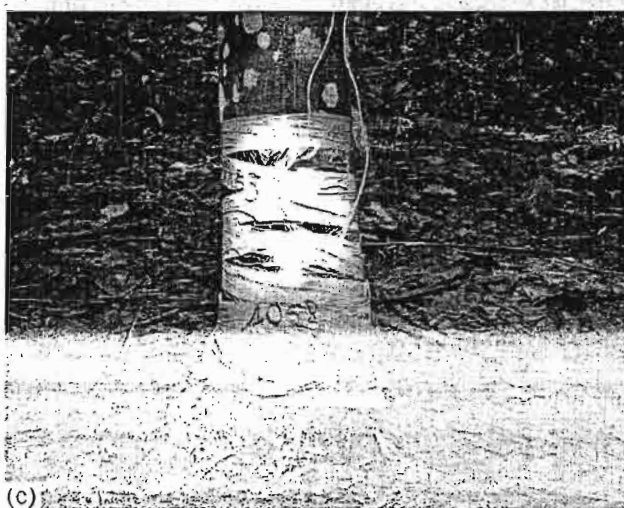
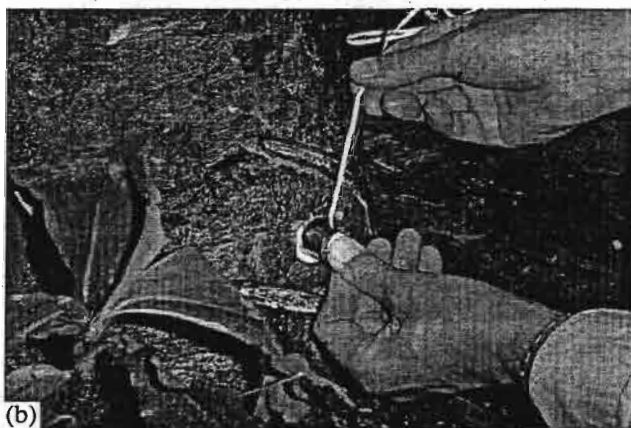
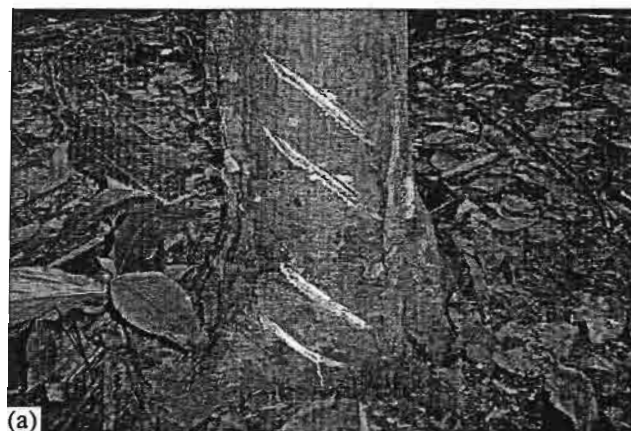


Photo 2a-c. Setting of the micro-psychrometer of Dixon into level of the grafting junction for measurements of xylem water potential (Ψ_{stem} and Ψ_{root} , bars).

CONCLUSIONS AND APPLICATIONS

These first results show a difference in functioning between “healthy” and “necrosed” trees in the regulation of transpiration flow: for the “necrosed” trees there would be a barrier to the sap flow (in the hydraulic architecture of the xylem) which would be at the

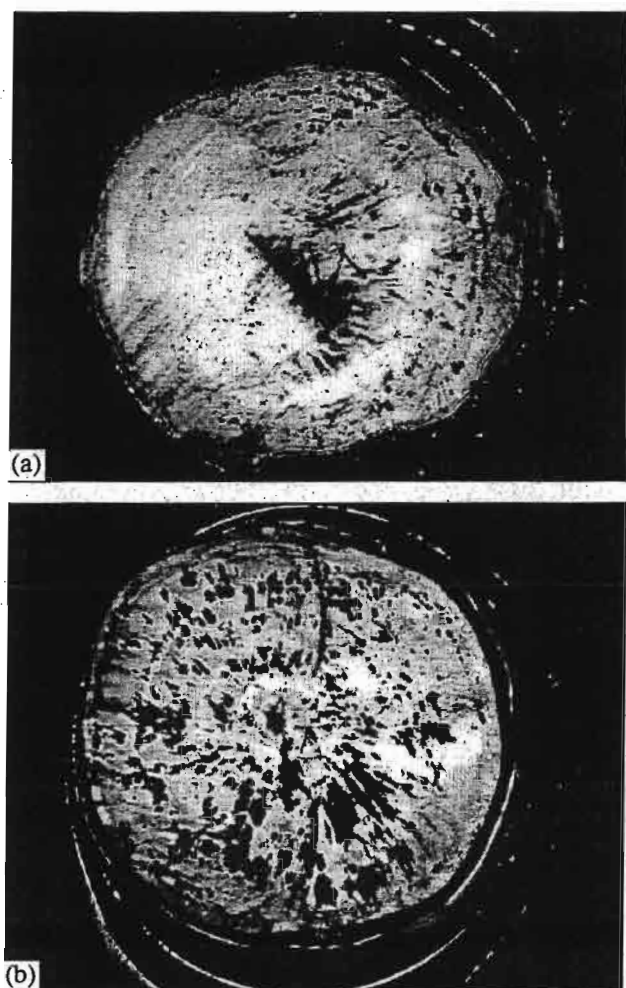


Photo 3. Upper surface of a block of wood taken on the stem at the level of the grafting junction put in a bath of Phoxine B[®]: (a) of a "healthy" tree and (b) of a "necrosed" tree.

level of the grafting junction, due to an abnormal vascularization; such a vascularization can originate in the quality of the grafting (mechanical problem of origin) or a pathology with an external agent introducing itself at the moment of the grafting.

This *in situ* investigation could continue with the following improvements:

1°) to take into account a larger sample of trees, to take into account the variability intra cover, inter trees and inter season (from the budburst to the adult leaf then up to the senescent leaf for a given tree).

2°) larger ranges of water availability, on the one hand in natural conditions to obtain data in limited conditions of water availability, and on the other hand in controlled conditions (crops) with several monitored levels of water availability, thus:

(a) concerning kinetics of stomatal resistances, transpiration, potentials over one day, one would have for example to obtain at noon the stomatal resistances

for the "necrosed" trees by far higher than those of the "healthy" trees and the transpirations quasi non-existent for these "necrosed" trees;

(b) concerning pre dawn potentials, the rebalancing between the soil and the trees during a long period of water shortage, could not be achieved in "necrosed" trees, one should be able to see a difference in the pre dawn potentials of "necrosed" trees in comparison to "healthy" trees and to obtain at the end of the night "necrosed" trees which already present an important water stress. The rebalancing of the potentials is a phenomenon requiring a minimal duration taking into account the velocity of the concerned physiological phenomena;

(c) concerning hydraulic conductivity on the level of the grafting junction, the potentials and transpiration could be studied with a step time resolution of measurement less than one hour.

To explain the state of the "necrosed" trees there would be a succession of the following events: abnormal vascularization at the level of the grafting junction inducing a resistance to the sap flow from roots to stem abnormally high from where stem xylem potentials abnormally negative and stomatal resistances abnormally high; such stomatal resistances would be in the beginning of a limitation of the net Carbon entry compared to the "healthy" trees.

Such a lack of Carbon would have an incidence on 1st) the photosynthetic capacity (far from probable) and on 2nd) the distribution of Carbon (highly probable). This assumption requires roots and shoots study, a study of the dynamics of constitution of the Carbon roots and shoots reserves and of their hierarchisation according to the shortage of Carbon compared to the "healthy" trees (amidon, latex...). The latex could be the reserve of Carbon the first to be affected by the lack of Carbon. Any limitation of the carbonous nutrition generally promotes the shoots' growth rather than that of roots and the constitution of the carbonaceous reserves [15]; one could note that the roots of the "necrosed" trees would have less mass than those of the "healthy" trees, which requires confirmation [1].

Finally, a possible genetic origin of the differences existing between "healthy" and "necrosed" tree should be studied.

Thus, an abnormal vascularization at the level of the grafting junction would induce an abnormal water balance, balance inducing in its turn the modifications of the carbonaceous metabolism, two associated phenomena expressing themselves by a cessation of latex production.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by Institut Français du Caoutchouc (Michelin-SIPH-SOCFINCO). The authors extend their deep gratitude to Chantal Fresneau (Université de Paris-Sud, Orsay), André

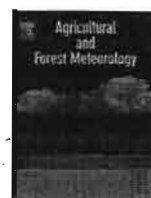
Clément-Demange, Jérôme Saint-Beuve (CIRAD-CP Hévée, France), Daniel Nandris, Frédéric Pellegrin and Hervé Chrestin (Institut de Recherche en Développement, Montpellier, France) for their assistance.

REFERENCES

1. Nandris, D., Chrestin, H., Pellegrin, F., and Moreau, R., Rapport de Synthèse de 1999 à 2004 sur la Nécrose de l'Écorce de l'Hévée, *Convention de Recherche "NEH" Entre l'IRD & IFC-Michelin-SIPH-SOFCINCO*, Montpellier, 2004.
2. Nizinski, J.J., Dingkuhn, M., Clément-Demange, A., Fabre, D., Clément-Vidal, A., and Sainte-Beuve, J., Analyse Écophysiologique 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, 2005.
3. Penman, H.L., Natural Evaporation from Open Water Balance Bare Soil, and Grass, *Proc. of the Royal Society*, London, 1948, Series A, vol. 193, 120–145.
4. Kramer, P.J. and Kozlowski, T.T., *Physiology of Woody Plants*, London: Academic Press, 1979.
5. Monteith, J.L., Evaporation and Environment. The State and Movement of Water in Living Organisms, *Sym. Soc. Exp. Biol.*, New York: Academic Press, 1965, 19, pp. 205–234.
6. Monteith, J.L. and Unsworth, M.H., *Principles of Environmental Physics*, London: Edward Arnold, 1990, 2nd ed.
7. Cruiziat, P. and Tyree, M., La Montée de la Sève Dans les Arbres, *La Recherche*, 1990, vol. 220, no. 21, pp. 406–414.
8. Philip, J.R., Plant Water Relations: Some Physical Aspects, *Annual Review of Plant Physiology*, 1966, vol. 28, pp. 71–88.
9. Nizinski, J.J., Luong-Galat, A., and Galat, G., Aspects Écophysiologiques de Nécrose Corticale de l'Hévée, *Geographia Technica*, 2009, pp. 355–360.
10. Landsberg, J.J. and Gower, S.T., *Applications of Physiological Ecology to Forest Management*, London: Academic Press, 1997.
11. Dixon, M., Temperature Corrected Stem Hygrometer, *Instruction Manual*, Plant Water Status Instruments, Inc., Guelph, 2004.
12. Monteny, B.A., 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, 1987.
13. Musy, A. and Soutter, M., *Physique du Sol*, Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1991.
14. Vanderchmitt, E., Analyse et Suivi de la Contrainte Hydrique Chez Soja: Mesure et Comparaison des Indicateurs en vue d'Une Modélisation des Transferts Hydriques, *Thèse de Doctorat*, Institut National Agronomique Paris—Grignon, 1993.
15. Le Roux, Y., Mise en Place de l'Architecture Racinaire d'*Hevea brasiliensis*. Etude Comparée du Semis et de la Microbouture, *Diplôme de Doctorat*, Université d'Aix Marseille III, Montfavet, 1994.

7. TO USE OF THE DIXON-TYREE STEM HYGROMETER IN A RUBBER TREE PLANTATION (Nizinski et al. 2013³)

³ 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



Use of the Dixon-Tyree stem hygrometer in a rubber tree plantation

Jerzy J. Nizinski^{a,*}, Jean-Pierre Montoroi^b, Norbert Silvera^b, Marc Lointier^b

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

^b Institut de Recherche pour le Développement, I.R.D., UMR 211 «BIOEMCO – Transferts», Centre d'Ile de France, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 September 2012

Received in revised form 6 January 2013

Accepted 19 January 2013

Keywords:

Dixon-Tyree stem hygrometer

Leaf water potential

Xylem water potential

Hevea brasiliensis

Côte d'Ivoire

ABSTRACT

The Dixon-Tyree stem hygrometer has hitherto been used primarily indoors in controlled conditions. We used it, and the leaf pressure chamber, to measure water potentials in plantation rubber trees outside in the Côte d'Ivoire (May and September 2004). Measurements of stem and root xylem water potentials were considered to be reliable, provided they complied with technical constraints that we specify. The stem hygrometer is non-destructive if the sensor is well installed, and provides measurements for two to three weeks without intervention, although the initial measurements are sometimes erroneous.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The Dixon-Tyree stem hygrometer has been used extensively indoors, in controlled conditions, but has rarely been used on trees *in situ* (Vanderchmitt, 1993). This study explores the use of the hygrometer outside on rubber trees in a plantation in the Côte d'Ivoire.

The trunks of rubber trees often suffer from necrosis, which is a deterioration of the cortical tissue where the conducting latex tissue is located, although, even in very severe cases, the cambium and xylem remain functional. Qualitative and quantitative observations (Nizinski et al., 2005), suggested an association between necrosis and increased negative water potentials, indicating a problem of access to water by the roots or water transport in the xylem.

We studied water transfers in rubber tree plantations in the Côte d'Ivoire by considering the soil, trees and atmosphere as a physical entity in which processes implemented for the circulation of water are interdependent. We measured the water potentials of: (1) leaves, using a pressure chamber and (2) sap (xylem) in the roots and stems using the Dixon-Tyree stem hygrometer. Measurements were carried out on "healthy" and "necrosed" trees that had been grafted 0.05–0.30 m above the ground (Nizinski et al., 2011).

2. Materials and methods

The Dixon-Tyree stem hygrometer theory is based on the fact that the water potential of plant tissues are proportional to the difference between air temperature (T) and dew point temperature inside the chamber containing the tissues whose water potential is being measured (Brucler, 1984; Dixon, 2004).

The theoretical water potential of plant tissue accounts for the potentials of pressure due to the pressure of water against the walls of the cells and with the pressure of water in the vessels, the osmotic potential due to the presence of dissolved substances in the water of the cells, the matric potential due to the capillary phenomena and with the phenomena of surface tension of water and finally the gravity potential. The water potential in a point of a plant can be expressed in energy per unit of mass (J kg^{-1}); this formulation is that used by physiologists for its simplicity and for the fact that there is equivalence with a pressure (Pa). This potential is expressed by:

$$\Psi_x = \left[\frac{RT}{V_{\text{water}}} \right] \ln \left[\frac{p}{p(T)} \right]$$

where Ψ_x is the xylem potential in a point (here Ψ_{root} and Ψ_{stem}) (J kg^{-1} or Pa); R the universal gas constant ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$; $8.31 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$); T the air temperature (K); V_{water} the molar volume of water ($\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$; $18 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{mol}^{-1}$); p the actual vapour pressure at temperature T (Pa); $p(T)$ is the saturation vapour pressure at temperature T (Pa).

* Corresponding author. Tel.: +33 2 38 49 95 25; fax: +33 2 38 49 95 76.
E-mail address: georges.nizinski@ird.fr (J.J. Nizinski).

In this equation, the unknown factor is p , the actual vapour pressure, vapour pressure in contact with plant tissue, here the xylem. To solve the problem, it is necessary to make assumptions on the equilibrium conditions inside the micropsychrometer's chamber.

By regarding the micropsychrometer's chamber as a closed enclosure with a source of water (here stem xylem or root xylem), balance is reached when the vapour is null. The law of Fick applies:

$$\Phi = D_e \left(\frac{dC_e}{dx} \right) \text{ then } \Phi = 0 \rightarrow \frac{dC_e}{dx} = 0$$

where Φ is the mass flux of water vapour ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$); D_e the vapour diffusivity in air ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); C_e the concentration of water vapour (mol m^{-3}); and x is the distance (m).

Balance is thus synonymous with uniformity of the vapour concentrations in the entire chamber of the psychrometer. According to the law of universal gas, the water vapour concentration is written in the form:

$$C_e = \frac{n_e}{V} = \frac{p}{RT}$$

where C_e is the concentration of water vapour (mol m^{-3}); n_e the number of moles of water in volume V (mol); V the considered volume (m^3); p the actual vapour pressure at temperature T (Pa); T the air temperature (K); and R is the universal gas constant ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$; $R = 8.31 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$).

Thus, uniformity of vapour concentration in the whole of the chamber results in a uniformity of the p/T ratio. By applying these results to the level of plant tissue (here the xylem, index t) and of the chamber at the point of measurement (index c), one obtains:

$$\frac{p_t}{T_t} = \frac{p_c}{T_c} \rightarrow p_t = \frac{T_t}{T_c} p_c = \frac{T_t}{T_c} p(T_{rc})$$

where p_t is the actual vapour pressure at temperature of plant tissue (xylem) T (Pa); T_t the temperature of plant tissue (xylem) (K); p_c the actual vapour pressure at the chamber temperature T_c (Pa); T_c the chamber temperature (K); and $p(T_{rc})$ is the saturation vapour pressure at the chamber temperature T_{rc} (Pa).

The measurements taken by the Dixon-Tyree stem hygrometer are those of: (a) the temperature in the chamber in all points, therefore at the point of measurement, T_c ; (b) the "dew point" temperature in this point of measurement, T_{rc} ; (c) temperature of plant tissue, T_t .

These measurements can be carried out in two modes (Fig. 1):

(a) "dew point" mode, then:

$$\Psi_x = \left[\frac{-\lambda_{\text{water}(T)}}{V_{\text{water}} T} \right] (T - T_r)$$

where Ψ_x is the xylem potential in a point (here Ψ_{root} and Ψ_{stem}) (Pa); $\lambda_{\text{water}(T)}$ the latent heat of vaporization of water at temperature T (J mol^{-1}) (at 20°C , $\lambda_{\text{water}} = 44,190 \text{ J mol}^{-1}$; at 25°C , $\lambda_{\text{water}} = 43,974 \text{ J mol}^{-1}$); R the universal gas constant ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$; $R = 8.31 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$); T_r the "dew point" temperature (K); T the air temperature (K); and V_{water} is the molar volume of water ($\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$; $18 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{mol}^{-1}$).

(b) "wet bulb" mode, then:

$$\Psi_x = \left[\frac{-\lambda_{\text{water}(T)}}{(V_{\text{water}} T)} \right] \left[\frac{p(T) + \gamma}{p(T)} \right] (T - T_h)$$

where Ψ_x is the xylem potential in a point (here Ψ_{root} and Ψ_{stem}) (Pa); $\lambda_{\text{water}(T)}$ the latent heat of vaporization of water at temperature T (J mol^{-1}) (at 20°C , $\lambda_{\text{water}} = 44,190 \text{ J mol}^{-1}$; at 25°C , $\lambda_{\text{water}} = 43,974 \text{ J mol}^{-1}$); V_{water} the molar volume of water

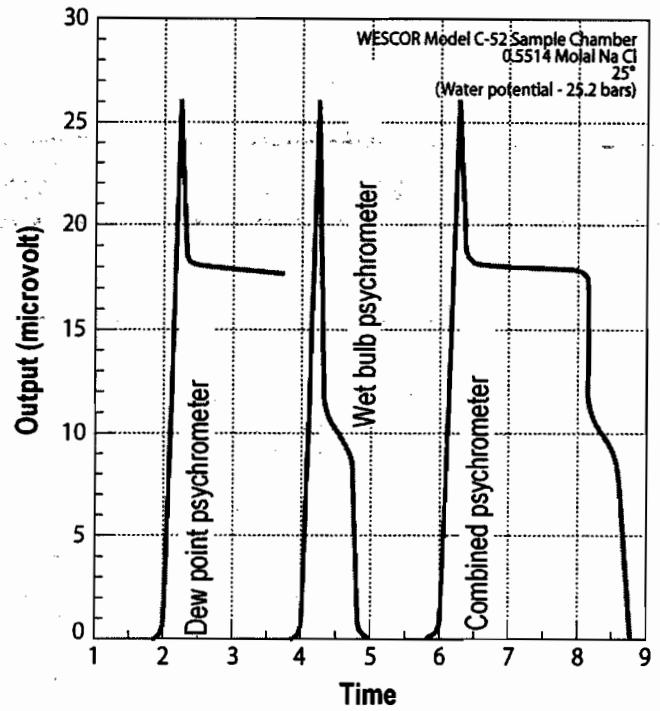


Fig. 1. Chart recording of thermocouple output (a) "dew point"; (b) "wet bulb"; (c) "combined" mode (Wescor HR-33T[®] microvoltmeter).

($\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$; $18 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{mol}^{-1}$); T_h the "wet" temperature (K); T the air temperature (K); $p(T)$ the saturation vapour pressure at the temperature T (Pa); γ is the psychrometer constant ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$):

$$\gamma = \frac{c_p P}{\lambda} \left(\frac{M_{\text{WATER}}}{M_{\text{AIR}}} \right)$$

where c_p is the air specific heat at constant pressure, in $\text{J kg}^{-1} (1012 \text{ J kg}^{-1})$; P the atmospheric pressure (kPa); λ the latent heat of vaporization of water (J g^{-1} ; 2451.8 J g^{-1}); M_{WATER} the molar mass of water (kg mol^{-1} ; $18 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$); and M_{AIR} is the molar mass of air (kg mol^{-1} ; $29 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$).

The latent heat of vaporization of water at temperature T ($\lambda_{\text{water}(T)}$) varies to a significant degree with the temperature during the day and must be preserved as such in the estimation of the correction of final water potential (Ψ_{root} and Ψ_{stem}).

On the rubber tree during the two series of measurements, this correction proved to be essential because the measured thermic gradients were of the order of difference $T_{\text{air}} - T_{\text{wet-bulb}}$ or $T_{\text{air}} - T_{\text{dew-point}}$. However, this correction has a limit in practice. Indeed, the curve relating saturation vapour pressure to temperature defines a physically prohibited zone. The assumption of uniformity of the concentrations in the chamber results in a straight line $p/T = \text{constant}$, passing by the origin and by the point T_c , such as $p(T_c) = p(T_{rc})$; the temperature of tissue cannot be lower than a certain value (closed area). With this limiting temperature, the water potential of tissue (here xylem) is then null since the temperature of tissue reached the dew point temperature of tissue. In other words, the conditions of validity of the correction correspond to a final water potential of tissue always negative or null.

2.1. Sampling and measurement technique

(a) Leaf water potential – pressure chamber (Ψ_{leaf}): the leaf is separated from the branch by means of a razor blade, at the base of

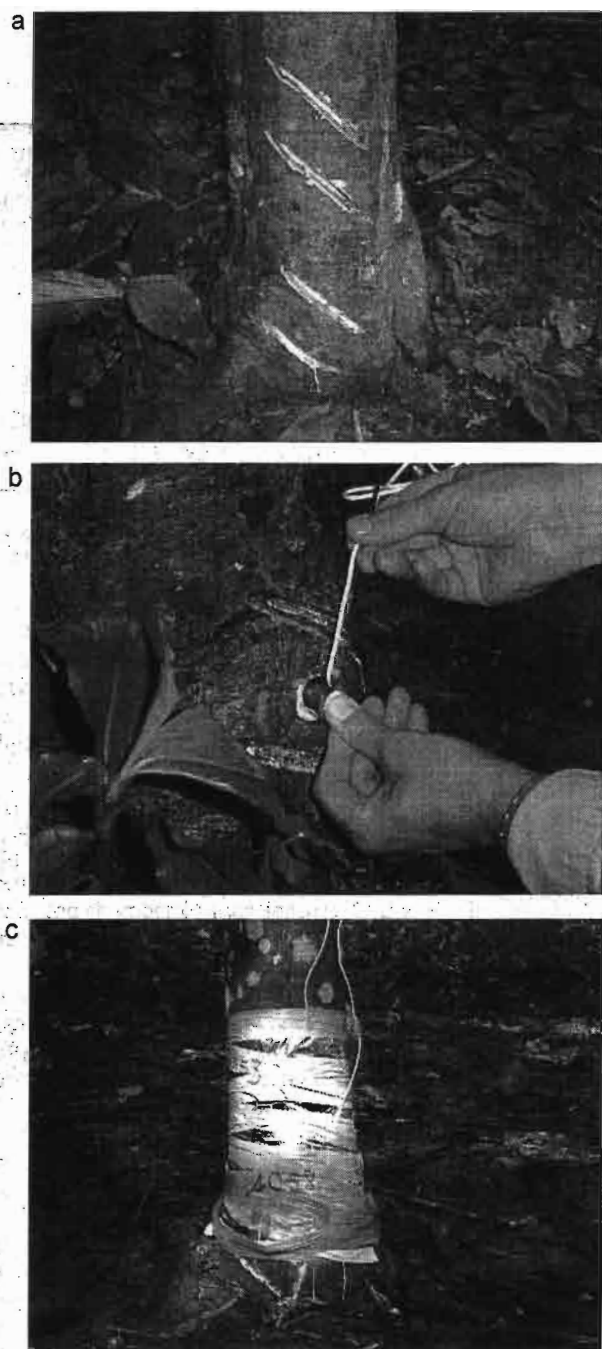


Photo 1. (a–c) Setting of the Dixon-Tyree stem hygrometer into level of the grafting junction for measurements of xylem water potential (Ψ_{stem} and Ψ_{root} , bars).

the petiole, and is introduced into the pressure chamber. This then measures the negative hydrostatic pressure in the petiole of the leaf starting from the balance between the water pressure of the leaf and pressure of the air (nitrogen) of the chamber (Ritchie and Hinckley, 1975), balance which is visible to the observer under the magnifying glass) by the appearance of the sap on the cut of the petiole.

We used the pressure chamber developed by PMS Instrument® (Corvallis, OR, USA); this chamber is portable and supplied with a nitrogen bottle (precision of measurements ± 0.5 bars).

- (b) **Xylem water potential (Ψ_{root} and Ψ_{stem}) – Dixon-Tyree stem hygrometer:** the Dixon-Tyree stem hygrometer (Plant Water Status Instruments Inc., Ontario, Canada) (Dixon, 2004) (Fig. 1)

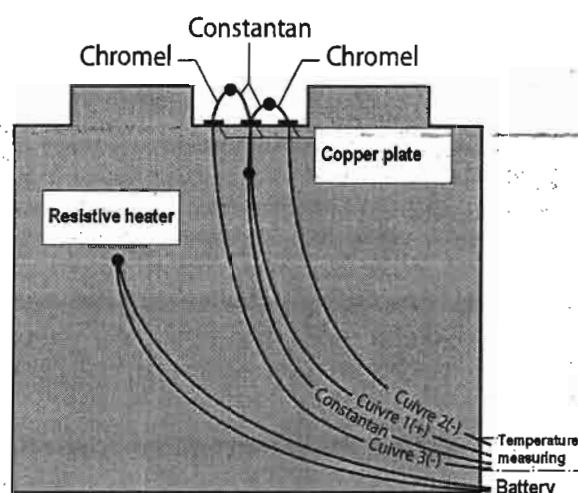


Fig. 2. The Dixon-Tyree stem hygrometer schema, sight of profile (Stem Psychrometer, Plant Water Status Instruments Inc., Ontario Canada).

must be calibrated and therefore be connected to Wescor HR-33T® dew point micro voltmeter. Two stem hygrometers are applied to the stem in two points before and after the junction of grafting (Photo 1a–c).

- **Principle:** the stem hygrometer (Fig. 2) uses the principle of cooling by Pelletier effect. Measurement is carried out in three times: (1) measurement of the ambient air temperature; (2) cooling by Pelletier effect of the air trapped in the sensor chamber up to the point of condensation. The vapour is saturated in the sensor chamber; one can thus determine the amount of water in the chamber of each sensor; (3) the water drop evaporates to equilibrate itself with the air of the chamber by generating an electromotive force (f.e.m.) that is measured. The passage of the value of the electromotive force to the value of potential is done by a curve standard of equation: $\text{f.e.m.} = a(\Psi_{\text{root}} \text{ or } \Psi_{\text{stem}}) + b$ (Fig. 4).

- **Calibration:** the calibration of the stem hygrometer is done in two steps (1) intrinsic adjustments of the stem hygrometer with an empty chamber determining their dew point (μV) (the sealing of the chamber of the stem hygrometer is necessary for accuracy of measurements); (2) establishment of the standard range of the water potential according to the concentrations of KCl in solution (Fig. 3) soaking the filter papers, range between 0 and 1 mol dcm^{-3} . Correspondences concentrations–potentials are established using a Wescor® table. To ensure an always identical volume of air in the chamber, the sealing is obtained by posing cement around the chamber of the stem hygrometer. The assigned time defined to balance the solutions and air inside the closed chamber of the stem hygrometer is 30 min. Measurements are not complicated but require permanent attention and care given the brittle nature of the thermocouples and sensitivity of the stem hygrometer to any change of temperature (Vanderchmitt, 1993).

- **Installation of the chamber of sensor:**

- (a) **studied rubber trees:** measurement of transpiration, potentials and resistances, of selected “healthy” and “necrosed” trees, matched by pair (“healthy” tree called H; “necrosed” tree called N); the two trees of each pair are close to one another so that they, had similar conditions of growth and are, at the moment of measurements, under similar conditions (light, shade): three pairs were selected (H–N) within the studied plot. We followed, on these trees, the daily kinetics of stomatal resistance, the

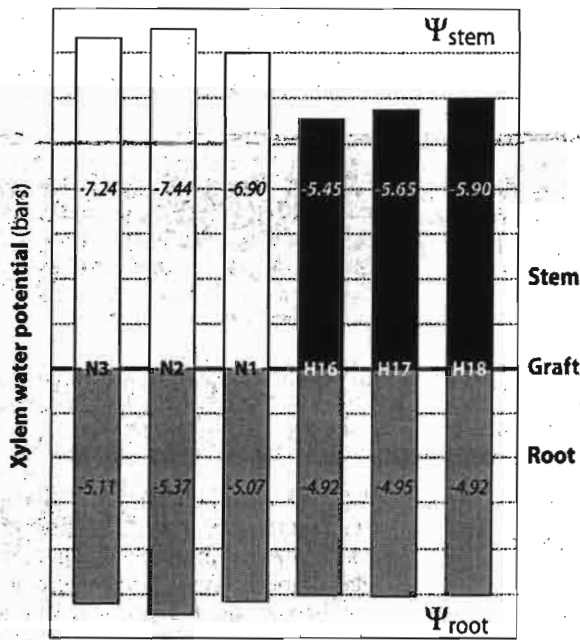


Fig. 3. Rubber trees plantation in Bongo, study plot – mean daily xylem water potential of stem and root (Ψ_{stem} and Ψ_{root}) of the “healthy” (H16–H17–H18) and of “necrosed” trees (N1–N2–N3) during the period from 11 to 22 of May and from 5 to 18 of September 2004.

leaves’ potential, the stem’s xylem potential, the root’s xylem (rootstock) potential and the corresponding pre dawn potentials.

- (b) *installation of the sensor chamber*: there is rubber flow at the incision of the bark, it is necessary to “empty” the rubber from the area around the stem hygrometer and this, by scarification of the stem above and below the sites of the chambers (Photo 1a). Approximately 12 h are needed before continuing the installation of the stem hygrometer.

Measurement is carried out on the conducting tissue of crude sap (xylem) using the sensor chamber which is a cylindrical chamber with 25 mm in diameter; to install this sensor, it is necessary to peel a small circle using a punch 40 mm in diameter. This incision must be thoroughly rinsed with distilled water and properly dried; this operation must take place when the tree is in full turgescence and transpires the least possible (in the early morning). The incision of the stem of the rubber tree must reach the active part of xylem to measure the actual water potential of the conducting tissue. Before being installed, the edges of the sensor are covered with “terostat[®]”, waterproof cement and then put in force in the peeled stem (Photo 1b). With this type of cement the sealing is more satisfactory than with the recommended silicone grease. The solid maintenance of the device against the stem is obtained using quite tight “Craft” ribbons and the insulation by using isothermal bags coating the device and stem, the whole of it covered with a sheet of aluminium foil (Photo 1c).

- *Measurements of the xylem water potential*: it is advised to frequently check the battery of the micro voltmeter to be always beyond 16 V in absolute value (buttons BATT + and –). Procedure: (1) start Wescor HR-33T[®] dew point micro voltmeter (ON); (2) go to temperature reading (READ and T[°]) and then read the inside temperature of the stem hygrometer; (3) switch to reading of tension “CHAMBER” (READ, μV and C); (4) adjust the “ZERO” using the two buttons provided for this purpose (ZERO OFFSET); (5) switch to reading of tension

“SAMPLE” (READ, μV and S) and then read the f.e.m. corresponding to the temperatures differences; (6) switch back to reading of tension “CHAMBER” (READ, μV and C).

- (a) *“dew point” mode*: (7) set the “ π_v ” (cooling coefficient) by pressing on the “ π_v ” button while simultaneously turning the potentiometer noted “ π_v set” with the given value, according to the temperature read at stage (2); (8) activate cooling for a few seconds (COOL); (9) switch to reading mode of the dew point (DP), wait until the needle stabilizes and then read the f.e.m. corresponding to the $T_{\text{dew-point}} - T_{\text{air}}$ differences; (10) return to waiting mode (INPUT SHORT);
- (b) *“wet bulb” mode*: (7) activate cooling for a few seconds (COOL); (8) return to reading of tension (READ), wait until the needle stabilizes and then read the f.e.m. quickly corresponding to the $T_{\text{wet-bulb}} - T_{\text{air}}$ differences.

Whatever the mode – “dew point” or “wet bulb” mode, the reading of the f.e.m. is sensitive: attentively observe the deceleration of the needle of the micro voltmeter during its descent (reading on a dial with 30 graduations) and note the minimal graduation reached; this reading must be fast for the needle remains on this graduation only one split second. This way of data acquisition was imposed here by the absence of a datalogger recording the kinetics of the signal.

3. Results and discussion

Measurements were made during two periods: May and September 2004; we voluntarily present the results dissociating the two periods.

The cultivated trees are grafted thus, there is “a junction of grafting” on these trees; in our schema of compartments, the junction of grafting delimits the compartment “roots” and the compartment “stem” (see Nizinski et al., 2011 for comments).

3.1. Daily kinetics of the water potentials

We chose two categories of rubber tree which are characterized by their physiological state: the “healthy” tree (called H) and “necrosed” tree (called N), our working hypothesis was that they differentiate by their water potential, and by the fact that the junction of grafting is an additional resistance (brake) to water flow, from root’s xylem (rootstock) to stem’s xylem (graft); this possible differentiation in two populations will allow us to test the reliability of the Dixon-Tyree stem hygrometer: the likelihood that erroneous measurements randomly dispersed help distinguish, nevertheless, two distinct populations, and this, for the two compartments “stem” and “root”, approaches zero.

- *Mean daily leaf water potential (Ψ_{leaf})* are respectively, for the “healthy” and “necrosed” trees: $\Psi_{\text{leaf}} = -6.0 (\pm 0.91)$ bars and $\Psi_{\text{leaf}} = -8.6 (\pm 1.40)$ bars in May, and $\Psi_{\text{leaf}} = -6.1 (\pm 1.04)$ bars and $\Psi_{\text{leaf}} = -7.4 (\pm 1.35)$ bars in September, so the leaf potential of the “necrosed” tree is lower by approximately 15% (–2.1 bars) than that of the “healthy” tree; value comparable with that mentioned by Nandris et al. (2004).
- *Mean daily xylem water potential (Ψ_{root} and Ψ_{stem})* are respectively, for the “healthy” and “necrosed” trees (Fig. 3):
 - (a) for the “roots”
 - $\Psi_{\text{root}} = -3.9$ bars and $\Psi_{\text{root}} = -4.2$ bars, in May;
 - $\Psi_{\text{root}} = -4.9 (\pm 0.09)$ bars and $\Psi_{\text{root}} = -5.2 (\pm 1.10)$ bars, in September;
 - (b) for the “stems”

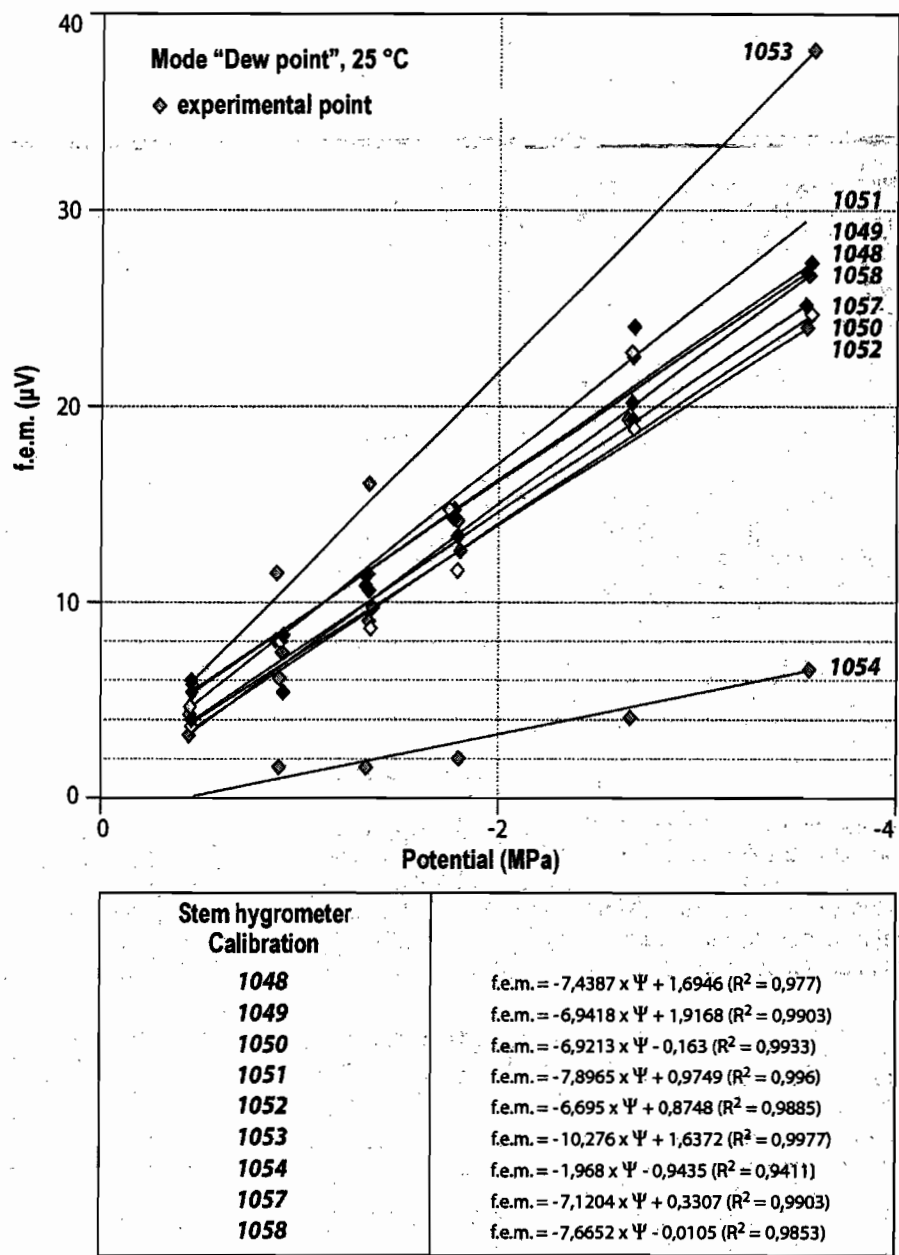


Fig. 4. The calibration curves of the Dixon-Tyree stem hygrometer "dew point".

$\Psi_{\text{stem}} = -4.6 (\pm 0.87)$ bars and $\Psi_{\text{stem}} = -5.6 (\pm 1.32)$ bars, in May;
 $\Psi_{\text{stem}} = -5.6 (\pm 1.09)$ bars et $\Psi_{\text{stem}} = -7.2 (\pm 0.97)$ bars, in September.

For the "roots", the water potential of the "necrosed" trees is lower by only 5–6% (0.3 bars) than that of the "healthy" trees; whereas for the "stems" it is lower by 20–22% (1–1.2 bars).
Statistical analyses: The assumption is tested that "healthy" trees differ from "necrosed" trees.
* leaf water potential (Ψ_{leaf}) (Table 1): on the plot there are 388 data divided into 15 series over 12 days allowing us to compare three "necrosed" trees (N1, N2, N3) and three "healthy" trees (H16, H17, H18). The distribution of these data for the variable Ψ_{leaf} is normal, and extends from 3.0 to 13.0 bars, with an overall average of 6.8 bars and averages per series ranging between 5.3 and 8.7 bars. The statistical analysis shows a strong interaction between

the series of measurements and trees: it is thus not possible to regroup the series and it is advisable to examine them one by one.
Table 1 indicates that five series do not provide an indication in favour or against the assumption (neutral result), while ten series consolidate it more or less. No series goes in the opposite direction to the assumption, the starting assumption, differentiation of the "healthy" and the "necrosed" trees. The assumption can be regarded as validated insofar as the strong variability of the phenomenon and the weakness of the sampling tend to reduce the observed phenomenon (reduction of the power of the test): the "necrosed" trees had the leaf water potential significantly lower than that of the "healthy" trees.
* xylem water potential of stem (Ψ_{stem}) and of roots (Ψ_{root}) (Table 1): the analyzed data relate to five trees: (*) N1, N2 and N3 – "necrosed"; (**) H16 and H17 – "healthy". There is only one couple of probes per tree; so we did not estimate the intra-tree variability of these water potentials for each of the two compartments "stem" and "roots".

Table 1

For the six trees studied (N1, N2, N3, H16, H17 and H18) the levels of significance of the leaf water potentials (Ψ_{leaf}) for each of the fifteen series of measurements of the “healthy” and of the “necrosed” trees (A = the leaf water potential (Ψ_{leaf}) most strongly negative; B = indicator of higher hydraulic resistance of the plant to water flow, from root’s xylem to stem’s xylem through grafting junction).

Series	Tree						Confirmation of Assumption
	N1	N2	N3	H16	H17	H18	
1			A	B			Yes
2	A	A	A	A	A	A	Neutral
3			A	B		B	Yes
4			A	B		B	Yes
5	A	AB	A	AB	AB	B	Partial
6	AB	A	A	AB	B	B	Partial
7	AB	A		AB	B	AB	Partial
8	B	AB		B	B	A	Neutral
9	A	A	A	A	A	A	Neutral
10	AB	A	A	AB	B	B	Partial
11	AB	A	B	B	B	B	Partial
12	A	B	B	B	B	B	Partial
13	A	A	A	A	A	A	Neutral
14	A	AB	A	AB	B	B	Partial
15	A	A	A	A	A	A	Neutral

Tree	Number of Data	$\Psi_{\text{root}} - \Psi_{\text{stem}}$	Significant	Significance Level
N3	16	1,64	A	0.0002
N2	16	1,56	A	
N1	16	1,41	A	
H17	16	0,65	B	
H16	16	0,49	B	

Mean values are highlighted in gray.

The analyzed data are raw measurements, before their transformation according to the curves of calibration of each sensor (Fig. 3). They come from sixteen series of measurements on five trees, that is 80 measurements of the potential Ψ_{stem} , and 80 measurements of the potential Ψ_{root} ; thus 80 differences of xylem water potential and root’s xylem (rootstock) potential ($\Psi_{\text{stem}} - \Psi_{\text{root}}$).

Table 1 and Fig. 5 present for the five trees (N1, N2, N3, H16 and H17), variations of the difference of xylem water potential ($\Psi_{\text{stem}} - \Psi_{\text{root}}$) during 16 series. The fact of having only one

measurement ($\Psi_{\text{stem}} - \Psi_{\text{root}}$) per tree and series prevents us from evaluating the interaction series versus trees. In spite of that, a significant difference appears between the “necrosed” and the “healthy” trees, with a potential difference between roots and stem noticeably stronger for the “necrosed” than for the “healthy” trees, thus validating our hypothesis: there is a higher resistance to the sap flow through the junction of grafting at the “necrosed” tree (Nizinski et al., 2011).

3.2. Pre dawn potential

The pre dawn potential accounts for the balance of the soil water potential – potential of the measured compartments (leaf, stem, roots) which establishes during the night, period without transpiration; this potential tends, without necessarily reaching it, towards the soil water potential.

When the soil is wet, as it is the case for the two periods of measurements where the soil water content is close to the field capacity ($\Psi_{\text{soil}} < 0.1$ bars), the rebalancing of the water potential in the different compartments of tree, leaf–stem–roots is optimal, and thus the pre dawn potential of roots–stem–leaf should not differ. Thus, the comparison of the pre dawn potentials of the roots and stem, measured with Dixon-Tyree stem hygrometer and the pre dawn potentials of leaf, measured with the pressure chamber, will allow us to validate or not the measurements made with Dixon-Tyree stem hygrometer. We obtain the following results:

for “healthy” trees:

- in May $\Psi_{\text{leaf}} = -3.2$ bars, $\Psi_{\text{stem}} = -4.1$ bars and $\Psi_{\text{root}} = -4.1$ bars;
- in September $\Psi_{\text{leaf}} = -3.8$ bars, $\Psi_{\text{stem}} = -4.0$ bars and $\Psi_{\text{root}} = -4.0$ bars;

for “necrosed” trees:

- in May $\Psi_{\text{leaf}} = -3.6$ bars, $\Psi_{\text{stem}} = -4.1$ bars and $\Psi_{\text{root}} = -4.1$ bars;
- in September $\Psi_{\text{leaf}} = -3.4$ bars, $\Psi_{\text{stem}} = -4.0$ bars and $\Psi_{\text{root}} = -4.0$ bars.

For any tree, there is a systematic difference from 0.2 to 0.9 bars, between the pre dawn potential of the leaf and the pre dawn potentials of the stem and roots, the pre dawn potential of the leaf being lower than that of the stem or the roots.

This difference from 0.2 to 0.9 bars is of the same order of magnitude as the precision of measurements of the pressure chamber (± 0.5 bars), allows us to consider valid measurements made with Dixon-Tyree stem hygrometer; we will thus estimate that these measurements give an account of a good rebalancing of the water potential in the different compartments (leaves–stem–roots) of the “healthy” and “necrosed” trees: in spite of a high hydraulic resistance to the waterflow through the grafting junction ($r_{\text{root-stem}}$) in the “necrosed” tree, the duration of the night is nevertheless sufficient so that the rebalancing of the potentials is done in the same way as for the “healthy” trees.

We must clarify this systematic discrepancy from 0.2 to 0.9 bars: first of all such a systematic gap return not to the precision of measurements by the stem hygrometer but with their calibration, depending on the characteristics of the Wescor 33-HT®; thus, (a) if this gap corresponds to an error of measurement, then it is necessary to re-examine the calibration of the Wescor 33-HT®; (b) if, a contrario, it is supposed that measurements by the stem hygrometer correspond to the real phenomenon, it is the concept of pre dawn potentials which should be re-examined.

Whatever may be the case, ideal measurements would suppose continuous measurements, with one hour step resolution, the pre dawn potentials at the canopy level (leaf) and the xylem pre dawn

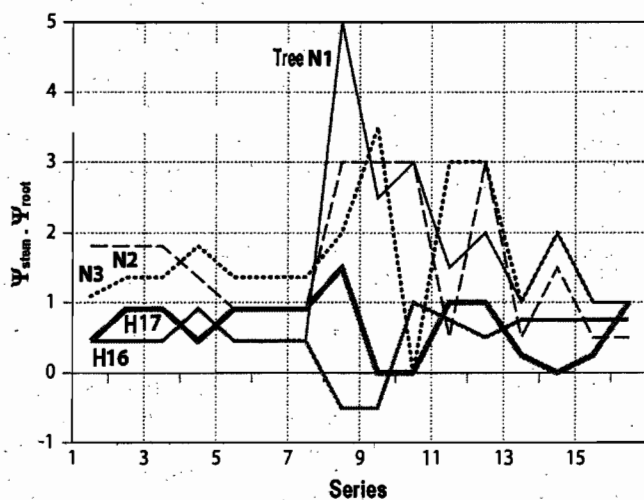


Fig. 5. Variations of the xylem water potential gradient ($\Psi_{\text{stem}} - \Psi_{\text{root}}$) during sixteen series of the five trees studied (N1, N2, N3, H16 and H17).

potentials of stem, all the way up to the last branches of the stem (for example a measurement every meter).

3.3. Some characteristics of measurements with Dixon-Tyree stem hygrometer

Our results show two singularities, one at the beginning and the other in the middle of the day. An increase of the xylem water potential is noticed in the early morning, probably related to the dew deposited on the trunk of the rubber tree, we would then be faced with a design flaw in the device. Around noon there is a strong potential drop when indeed the xylem water potential is the furthest away from the leaf water potential but it is to know what the margin of error for these measurements is.

The bibliography about this subject is quite poor (Vanderchmitt, 1993). Comparisons of water potential obtained by stem hygrometer and by pressure chamber are numerous but given in controlled conditions, with a stabilized air temperature. Even under these conditions, the studies are incomplete: Garnier and Berger (1985) recommend the use of a pressure chamber on the leaf inside a plastic bag covered with aluminium to obtain a leaf water potential equivalent with the xylem water potential: such a measurement system can be used only in controlled conditions or semi-controlled, on small trees with few leaves, but obviously not *in situ*.

4. Conclusions

We make five observations or recommendations for the correct use of the Dixon-Tyree stem hygrometer on trees outdoors.

- (1) The measurement of xylem water potential using the Dixon-Tyree stem hygrometer has the advantage of being non-destructive. If the sensor is well installed, it can be left in place for two weeks before tissue healing affects the measurements.
- (2) Because measurements are based on readings of tension, it is possible to automate the process (Valancogne and Daudet, 1974). Nevertheless, difficulty lies in the fact that there are weak tensions and that, in the case of very weak tensions (range of the nanoVoltes – very high potentials), are not always easily measured reliably by a datalogger (electronic problems). The ideal situation would be a parallel visual reading and recording on a datalogger. The automatic recording of the data is, in addition, impossible to circumvent if one wants measurements of water potential continuously over several consecutive whole days; using a datalogger can very easily be considered for very negative potentials in conditions of very strong soil-water deficit, in semi-controlled growing conditions.

- (3) The data resulting from the first days of measurement were sometimes erroneous, especially in the first four hours. It is preferable to wait the following day to begin measurement. At the time of our two series of measurements the sensors offered more than 15 days of satisfactory results.
- (4) When measuring, it is imperative as much as it is possible to ensure the quality of the sealing and the heat insulation of the probe (chamber). The relative humidity in the chamber is always close to saturation, so a tiny variation in temperature has an important effect. External air should not come in to modify the relative humidity of the air of the probe (in the chamber).
- (5) The end of the sensor cable should be a "clip" type, which enables repeated readings to be made on a Wescor HR-33T® dew point micro voltmeter. From the two modes of reading: "dew point" and "wet bulb" mode, the first was preferred because of its greater sensitivity and easier reading. However, the use of this mode has a limit corresponding to a cooling coefficient π_v not exceeding 92.5, beyond which it is necessary to switch to "wet bulb" mode.

Acknowledgements

This study was supported by Institut Français du Caoutchouc (Michelin-SIPH-SOCFINCO). We thank General Management of SAPH and personnel of the plantation of Bongo (Côte d'Ivoire) for field assistance.

References

- Brucler, L., 1984. Utilisation des micropsychromètres pour la mesure du potentiel hydrique du sol en laboratoire et *in situ*. *Agronomie* 4 (2), 171–182.
- Dixon, M., 2004. Temperature Corrected Stem Hygrometer. Instruction Manual, Plant Water Status Instruments, Inc., Guelph, 14 pp.
- Garnier, E., Berger, A., 1985. Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. *J. Appl. Ecol.* 23, 193–209.
- Nandris, D., Chrestin, H., Pellegrin, F., Moreau, R., 2004. Rapport de Synthèse de 1999 à 2004 sur la Nécrose de l'Ecorce de l'Hévéa. Convention de recherche «NEH» entre l'IRD & IFC-Michelin-SIPH-SOCFINCO, Montpellier, 150 pp.
- Nizinski, J.J., Dingkuhn, M., Clément-Demange, A., Fabre, D., Clément-Vidal, A., Sainte-Beuve, J., 2005. Analyse écophysiolgique 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 pp.
- Nizinski, J.J., Galat, G., Galat-Luong, A., 2011. Bioclimatological analysis of the bark necrotic rubber tree in Côte d'Ivoire plantations. *Russ. Agric. Sci.* 37 (1), 58–67.
- Ritchie, G.A., Hinckley, T.M., 1975. The pressure chamber as an instrument for ecological research. *Adv. Ecol. Res.* 9, 165–254.
- Valancogne, C., Daudet, F.A., 1974. Adaptation de la technique micropsychrométrique à l'enregistrement du potentiel hydrique dans le sol en place: problèmes posés par la température. *Ann. Agron.* 25 (5), 733–751.
- Vanderchmitt, E., 1993. Analyse et suivi de la contrainte hydrique chez soja. Mesure et comparaison des indicateurs en vue d'une modélisation des transferts hydriques. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 96 pp.

8. MESURE DE L'EVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VEGETAUX DANS LES ZONES ARIDES : PROBLEMES ET SOLUTIONS (Nizinski et al. 2014¹)

¹ Nizinski J.J., Montoroi J.-P. & Lointier M., 2014. Mesure de l'évapotranspiration des couverts végétaux dans les zones arides : problèmes et solutions. *Sécheresse-Changes globaux* (sous presse)

MESURE DE L'EVAPOTRANSPIRATION DES COUVERTS VEGETAUX DANS LES ZONES ARIDES : PROBLEMES ET SOLUTIONS

Jerzy Jan Nizinski⁽¹⁾, Jean-Pierre Montoroi⁽²⁾ & Marc Lointier⁽²⁾

(1) **Corresponding autor:** Institut de Recherche pour le Développement – I.R.D., UMR 211 « BIOEMCO - Biogéochimie et écologie des milieux continentaux - Interactions biologiques dans les sols », Centre d'Ile de France, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France, phone: (33) 2-38-49-95-25, fax: (33) 2-38-49-95-76; courriel: georges.nizinski@ird.fr

(2) Institut de Recherche pour le Développement, I.R.D., UMR 211 « BIOEMCO – Transferts », Centre d'Ile de France, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France

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.

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:

$$E_p = (((\Delta R_n)/\lambda) + (\gamma E_a))/(\Delta + \gamma) \quad [1]$$

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 ($\Delta = e_{s(t)} - e_{s(th)}/t - th$); avec: $e_{s(t)}$ -pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface t, en kPa; $e_{s(th)}$ -pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface humide th, en kPa; t-température de l'air, en °C; t_h -température humide de l'air, en °C); R_n -rayonnement net ou effectif, en W m⁻²;

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

Avec: R_g -rayonnement solaire global, en W m⁻²; R_a -rayonnement atmosphérique, en W m⁻²; R_t -rayonnement terrestre, en W m⁻²; g-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):

$$ETR = E_p / (1 + (\gamma / (\Delta + \gamma)) (r_{sv} / LAI r_a)) \quad [6]$$

Avec: ETR-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):

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

et

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

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):

$$r_a = (1/(k^2 u_{2M}) [\ln((z-d)/z_0)]^2 \quad [9]$$

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.

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 $2,5\ cm\ s^{-1}$ à $5,0\ cm\ s^{-1}$); pour les couverts arborescents (chênaie, plantation d'Eucalyptus, Photo n°3) nous avons calculé g_a à partir de la hauteur du peuplement:

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

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

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* - $LAI=100\%$; $r_{st-min}=3,6\pm0,9\text{ s cm}^{-1}$; $LAI=8\%$; $r_{st-min}=8,7\pm3,6\text{ s cm}^{-1}$) (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 semaine). Ensuite, la r_{st-min} réaugmente pendant toute la période du LAI_{max} (deux mois et demi pour le chêne) pour continuer d'augmenter lors de la sénescence (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 $Z_{AE} \approx [3,5 \times (\text{hauteur du peuplement})]$ 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 augmentation des surfaces herbacées et de sol nu au détriment des surfaces peuplées d'arbres et arbustes depuis le néolithique. Les modifications du couvert végétal participent à l'évolution des climats locaux, des climats régionaux et du climat global terrestre.

Les modèles climatiques de circulation générale de l'atmosphère nécessitent des modèles d'évapotranspiration réelle rendant compte des échanges végétation – atmosphère les plus réalistes possibles. Notre étude au Sénégal de la steppe à *Acacia raddiana* et à *Balanites aegyptiaca* (Nizinski et al. 1994) et notre étude au Congo de la savane à *Loudetia arundinacea* et des plantations d'Eucalyptus sur le littoral (Nizinski et al. 2011) offrent deux exemples de l'incidence d'une modification du couvert sur l'évapotranspiration réelle: au Sénégal, les bosquets de la steppe (20 % de la surface) peuvent être assimilés à ce qu'était la forêt claire à *Acacia senegal* du Nord du Sénégal avant que cette forêt ne disparaisse et les 80 % de surface herbacée représente le nouvel écosystème.

Au Congo, sur le littoral, il existe des lambeaux de savane pure jouxtant les forêts d'Eucalyptus plantées sur cette savane d'origine. Le remplacement de la forêt par un écosystème herbacé augmente le drainage et diminue l'évapotranspiration réelle sur un cycle complet de végétation (avec des variations saisonnières qui peuvent être marquées puisqu'en saison de déficit hydrique les deux écosystèmes se différencient moins qu'en saison humide où l'évaporation de l'eau interceptée est plus grande pour la forêt à cause de sa forte rugosité).

La conductance de surface des deux couverts diffère peu, ce qui diffère, c'est 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'ETAT 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 défends de la parcelle expérimentale, il y a eu constitution d'une croûte et non renouvellement de la strate herbacée car cette surface n'était plus piétinée par les troupeaux; la 2^e année un sarclement 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 $1 - e^{(-k \text{ LAI})}$ où k représente le coefficient d'extinction de la lumière dans le couvert (Saugier, 1996).

En fonction du type de végétation, l'écart à cette courbe est plus ou moins grand. L'estimation et la modélisation de l'indice foliaire sont donc essentielles. Nous illustrerons l'influence de l'indice foliaire sur l'évapotranspiration réelle à partir de deux situations: la chênaie tempérée, forêt caduque que nous avons suivie plusieurs années du débourrement jusqu'à la chute des feuilles, et la steppe sahélienne, végétation hétérogène.

Dans le cas **des espèces caducifoliées**, il s'agit de modéliser les différents événements phénologiques: le jour de débourrement, la période de croissance foliaire jusqu'à indice foliaire maximal, la phase adulte pendant laquelle l'indice foliaire $\text{LAI} = \text{LAI}_{\text{max}}$, le début de la sénescence, de la chute des feuilles jusqu'à moment où l'indice foliaire s'annule. Avec deux variables d'entrée simples, la température moyenne de l'air et la photopériode, nous avons modélisé pour *Quercus petraea*, le jour du débourrement, celui de la fin d'accroissement en surface des feuilles, l'évolution de l'indice foliaire.

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

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 profondes (au-delà de 2,0 m de profondeur) une lame d'eau qui était disponible pour *Balanites aegyptiaca* mais qui n'a pas été utilisé (augmentation de la résistance stomatique, diminution de la transpiration).

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

Une telle situation nous amène à faire deux suppositions:

(1^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_{PPF}) 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.

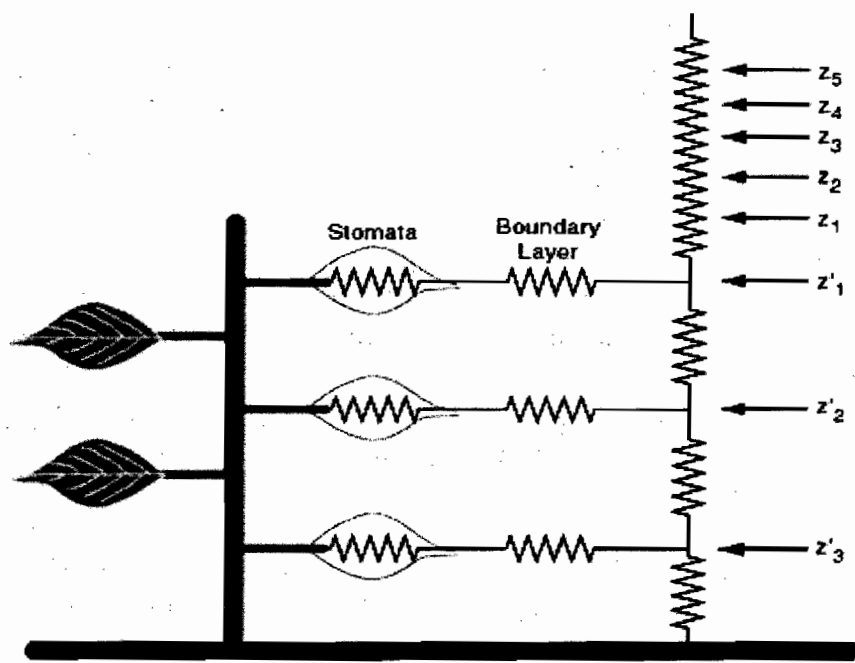


Figure 1

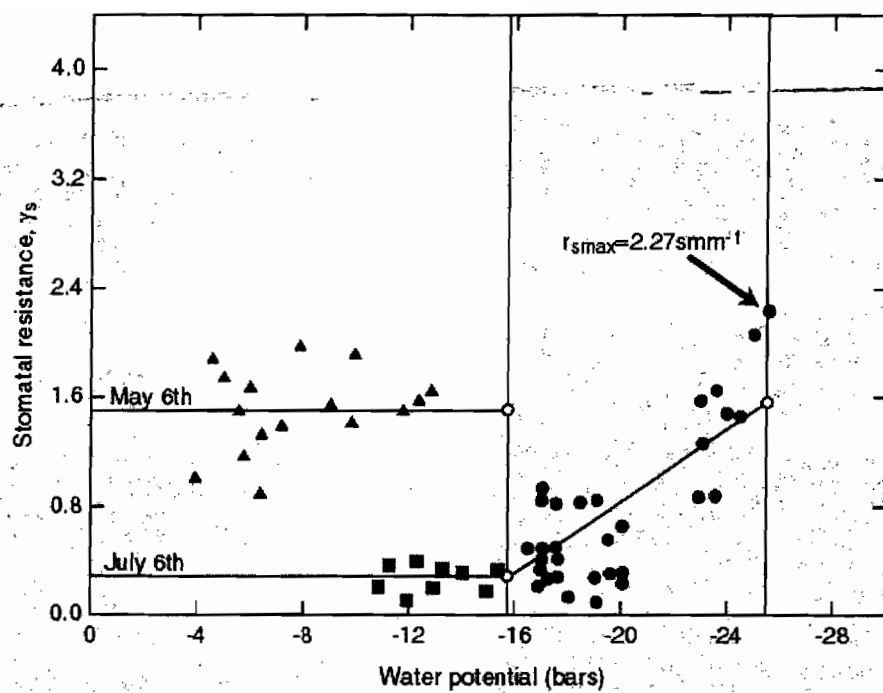


Figure 2

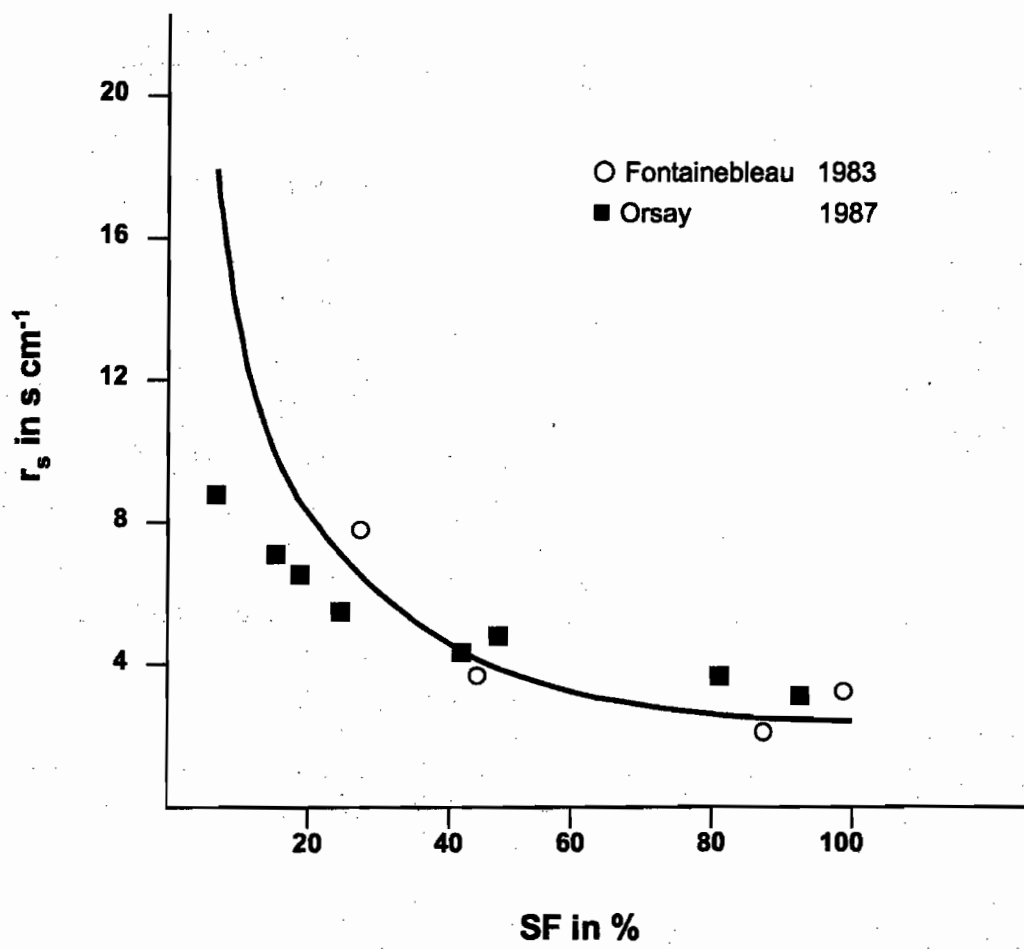


Figure 3

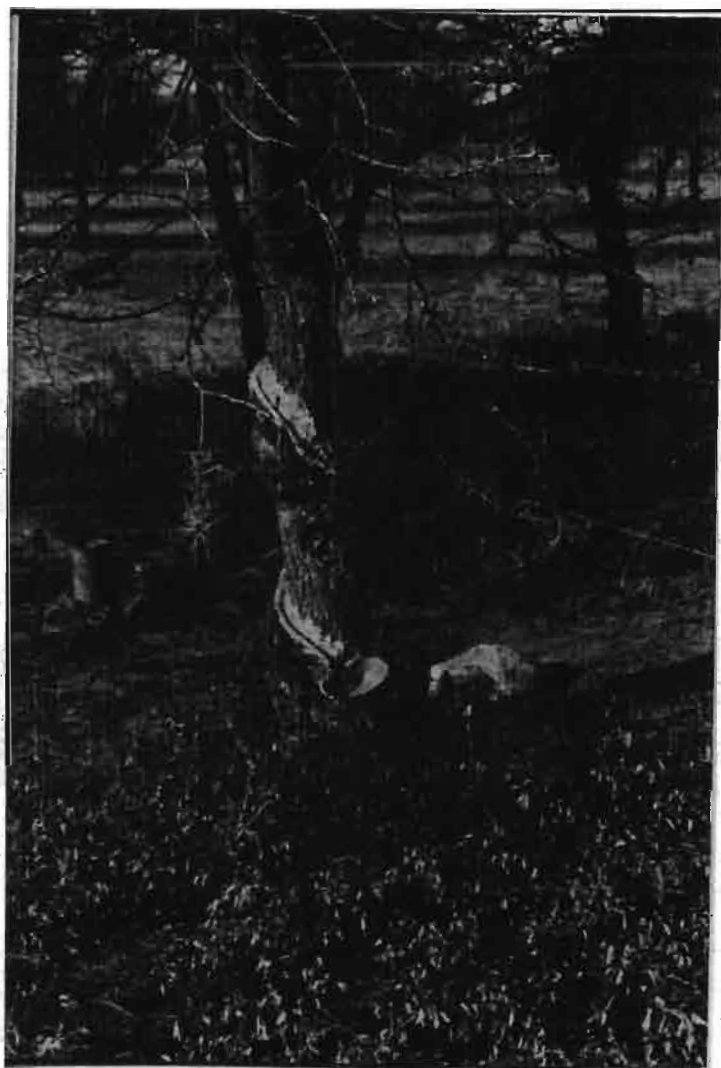


Photo 1



Photo 2



Photo 3

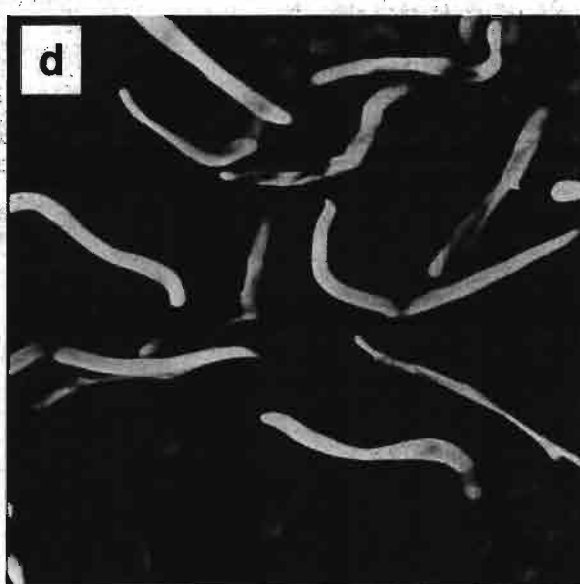
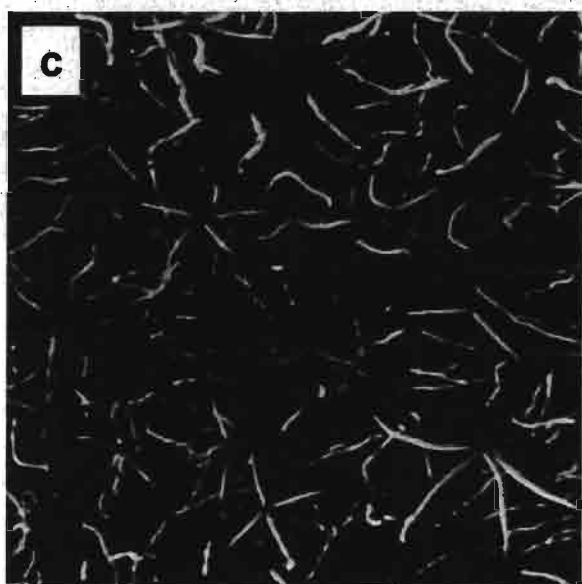
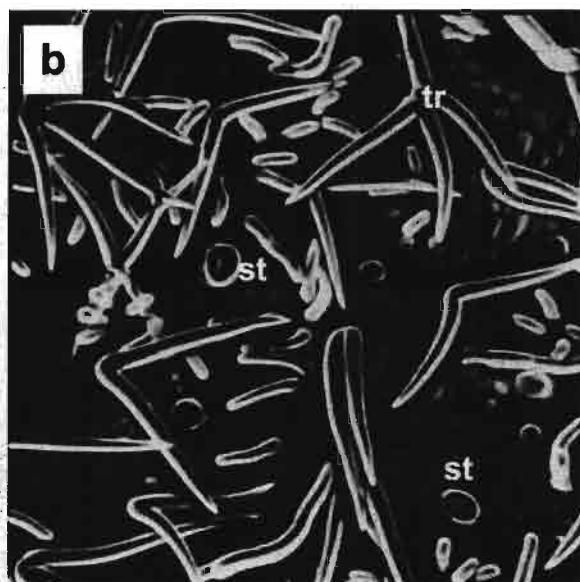
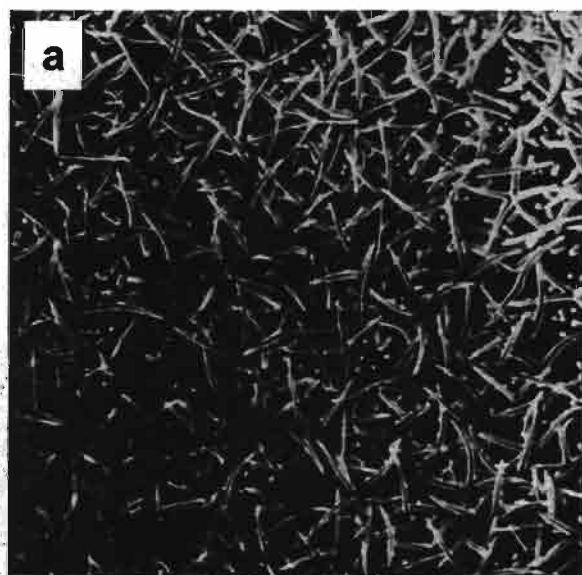


Photo 4