

L'INTÉRÊT DE L'UTILISATION *IN SITU* DES MICROPSYCHROMÈTRES DE DIXON-TYREE EN BIOCLIMATOLOGIE : CAS D'UNE PLANTATION D'HÉVÉA EN CÔTE D'IVOIRE

Jerzy J. NIZINSKI¹, Anh GALAT-LUONG², Gérard GALAT²
et Jean-Paul LHOMME²

¹ Institut de Recherche pour le Développement, IRD-UMR 211 BIOEMCO
'Biogéochimie et écologie des milieux continentaux - Interactions biologiques dans les sols'
Centre IRD d'Orléans
5, rue du Carbone
45072 Orléans cedex 2
georges.nizinski@ird.fr

² Institut de Recherche pour le Développement, IRD-UR 060 CLIFA
'Climat et fonctionnement des agro-écosystèmes –
rôle de l'agrodiversité dans la stabilité de la production'
Centre IRD de Montpellier
911 avenue Agropolis, B.P. 64501
34394 Montpellier cedex 5

Résumé

Le micropsychromètre de Dixon-Tyree jusqu'alors essentiellement utilisé en conditions contrôlées en est encore au stade expérimental sur des peuplements ligneux *in situ*. Il a été ici utilisé pour la mesure du potentiel hydrique du xylème du tronc et des racines avec une chambre à pression pour la mesure du potentiel foliaire, dans le but de mesurer et comparer les potentiels hydriques des feuilles, du tronc et des racines d'individus d'hévéas dans une plantation en Côte d'Ivoire (mai et septembre 2004). Les mesures de potentiel hydrique du xylème avec le micropsychromètre de Dixon-Tyree ont été jugées fiables, à condition de respecter des contraintes techniques. Ce travail débouche sur un éventuel recalage des mesures et sur une redéfinition du potentiel de base. Les mesures par micropsychromètre, comparées à celles obtenues par chambre à pression ont l'avantage de ne pas être destructives si le capteur est bien installé. Ce dernier peut être laissé sur le tronc deux à trois semaines, sans intervention. Les valeurs issues des premières journées de mesure sont parfois erronées en raison d'un manque d'équilibre et il est préférable d'attendre le lendemain pour commencer les séries de mesures.

Mots-clés : micropsychromètre de Dixon-Tyree, potentiels hydriques de feuilles et du xylème, *Hevea brasiliensis*, Côte d'Ivoire

Abstract

Interest for bioclimatologist using *in situ* the stem psychrometers of Dixon-Tyree: case of a rubber tree plantation in Côte-d'Ivoire

The stem psychrometers of Dixon-Tyree hitherto primarily used in controlled conditions reaches still the experimental stage on woody plantation *in situ*. We used the stem psychrometers of Dixon-Tyree (stem's xylem and root's xylem potential) and the pressure chamber (leaf water potential) to measure and compare the water potentials of the leaf, the trunk and the roots of rubber trees in a plantation in Côte-d'Ivoire (May and September 2004). Measurements of stem's xylem and root's xylem potential with the stem psychrometers of Dixon-Tyree were considered to be reliable, on the condition of respecting technical constraints of which we make the list. This work emphasizes to a possible validation of measurements and/or a possible readjustment of the concept of predawn potential. Measurements by stem psychrometer, compared with those obtained with pressure chamber have the advantage of not being destructive if the sensor is well installed. This last can be left on the stem two to three weeks, without intervention. The data resulting from the first days of measurement are sometimes erroneous because of a lack of balancing and it is preferable to wait the next day to begin the series of measurements.

Keywords: stem psychrometers, leaf water potential, stem xylem potential hydraulic conductance of a stem, *Hevea brasiliensis*, Côte d'Ivoire.

Introduction

Le matériel végétal utilisé pour étudier la méthode de mesure des potentiels hydriques par micropsychrométrie est l'hévéa, espèce présentant dans de nombreux peuplements une affection du tronc, la nécrose : environ 25 à 30% des individus sont affectés, dans l'ensemble des peuplements mondiaux (Nandris *et al.*, 2004), ce qui constitue un enjeu économique majeur. La nécrose de l'écorce de l'hévéa s'exprime par une altération des tissus corticaux au niveau desquels se situent les tissus conducteurs de latex. Même dans le cas d'attaques très sévères, le cambium et le xylème demeurent fonctionnels. Des observations qualitatives et quantitatives (Nizinski *et al.*, 2005) nous ont conduit à émettre l'hypothèse d'une association de la nécrose à un potentiel hydrique plus négatif chez les arbres nécrotiques, indiquant un problème d'accès à l'eau des racines ou de transfert de l'eau dans le xylème (Nizinski *et al.*, 2009).

Nous avons étudié les transferts hydriques dans des plantations d'hévéas en Côte d'Ivoire en considérant le sol, l'individu « hévéa » et l'atmosphère comme un système global dans lequel les processus mis en œuvre pour la circulation de l'eau sont interdépendants. Les hévéas considérés ici sont greffés : il existe donc une jonction de greffage située de 0,05 à 0,30 m du sol. Nous avons mesuré les potentiels hydriques : 1) des feuilles avec la méthode de la chambre à pression et 2) de la sève brute (xylème) des racines et du tronc avec la méthode du micropsychromètre de Dixon-Tyree. Les mesures ont porté à la fois sur des individus sains et des individus nécrosés (Nizinski *et al.*, 2009).

Les micropsychromètres de Dixon-Tyree ont jusqu'alors été utilisés essentiellement en conditions contrôlées, en laboratoire ; leur utilisation *in situ* sur des peuplements ligneux est récente et peu répandue (Vanderchmitt, 1993).

1. Matériel et méthodes

1.1. Principe de la mesure du potentiel hydrique avec un micropsychromètre de Dixon-Tyree

Le principe d'un micropsychromètre est basé sur la mesure de la différence de température entre la température de l'air extérieur au végétal et la température de rosée à l'intérieur d'une chambre contenant les tissus dont on veut mesurer le potentiel hydrique. Pour le cas du micropsychromètre de Dixon-Tyree (Dixon, 2004), le potentiel hydrique en tout point du tissu mesuré est proportionnel à la différence de température entre la température de l'air (T) et la température de rosée de l'air (T_r) en ce point (Bruckler, 1984).

Le potentiel total de l'eau dans un tissu végétal est la somme (*i*) des potentiels de pression dus à la pression de l'eau contre les parois des cellules et à la pression de l'eau dans les vaisseaux, (*ii*) du potentiel osmotique dû à la présence de substances dissoutes dans l'eau des cellules, (*iii*) du potentiel matriciel dû aux phénomènes capillaires et aux phénomènes de tension superficielle de l'eau et enfin, (*iiii*) du potentiel gravitaire. Le potentiel hydrique en un point d'un végétal peut s'exprimer avec une pression (en Pa) et s'exprime par :

$$\Psi_x = [(R T) / V_{\text{eau}}] \ln [p / p_{(T)}] \quad (\text{équation 1})$$

avec Ψ_x – potentiel hydrique du xylème en un point (ici Ψ_{racines} et Ψ_{tronc}), en Pa ; R – constante des gaz parfaits, en $\text{J Mole}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$ ($8,31 \text{ J Mole}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$) ; T – température de l'air, en $^\circ\text{K}$; V_{eau} – volume molaire de l'eau, en $\text{m}^3 \text{ Mole}^{-1}$ ($18,10^{-6} \text{ m}^3 \text{ Mole}^{-1}$) ; p – pression partielle actuelle de vapeur d'eau à la température T , en Pa ; $p_{(T)}$ – pression partielle saturante de vapeur d'eau à la température T , en Pa.

Dans cette équation, l'inconnue est p , la pression partielle de vapeur d'eau, pression partielle au contact du tissu végétal, ici le xylème. Pour résoudre le problème, il faut faire des hypothèses sur les conditions d'équilibre à l'intérieur de la chambre du micropsychromètre.

En considérant cette dernière comme une enceinte fermée avec une source d'eau (ici le xylème du tronc ou des racines), l'équilibre est atteint lorsque le flux de vapeur d'eau est nul. En considérant qu'il s'agit d'un phénomène diffusif, la loi de Fick s'applique :

$$\Phi = D_e (dC_e/dx) \quad \text{alors } \Phi=0 \rightarrow dC_e/dx=0 \quad (\text{équation 2})$$

avec Φ - flux de vapeur d'eau, en $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$; D_e - diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air, en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$; C_e - concentration de vapeur d'eau, en Mole m^{-3} ; x - distance, en m.

L'équilibre est atteint lorsqu'il y a uniformité des concentrations en vapeur d'eau dans toute la chambre du psychromètre. En considérant l'air humide comme un gaz parfait, la concentration en vapeur d'eau C_e s'écrit sous la forme :

$$C_e = n_e/V = p/(R T) \quad (\text{équation 3})$$

avec C_e - concentration de vapeur d'eau, en Mole m^{-3} ; n_e - nombre de moles d'eau dans le volume V , en Mole ; V - volume considéré, en m^3 ; p - pression partielle de vapeur d'eau, en Pa ; T - température de l'air, en $^{\circ}\text{K}$; R - constante des gaz parfaits, en $\text{J Mole}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Ainsi, l'uniformité de concentration en vapeur d'eau dans l'ensemble de la chambre se traduit par une uniformité du rapport p/T . En appliquant ces résultats au niveau du tissu végétal (ici le xylème, indice t) et de la chambre au point de mesure (indice c), on obtient :

$$p_t/T_t = p_c/T_c \rightarrow p_t = T_t/T_c p_c = T_t/T_c p(T_{rc}) \quad (\text{équation 4})$$

avec p_t - pression partielle actuelle de vapeur d'eau à la température du tissu (xylème) T , en Pa ; T_t - température du tissu végétal (xylème), en $^{\circ}\text{K}$; p_c - pression partielle actuelle de vapeur d'eau à la température de la chambre T_c , en Pa ; T_c - température du point de mesure dans la chambre, en $^{\circ}\text{K}$; $p(T_{rc})$ - pression partielle saturante de vapeur d'eau à la température T_{rc} du point de mesure dans la chambre, en Pa.

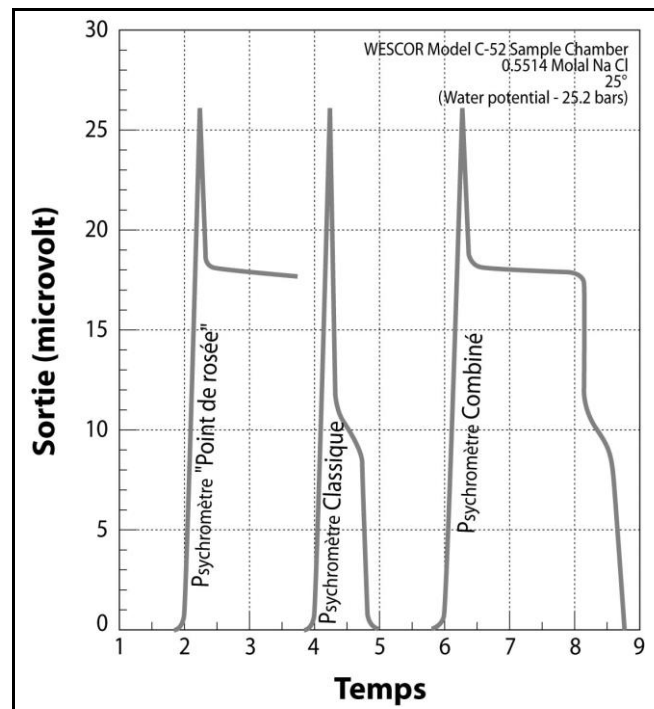
Ces mesures peuvent s'effectuer en deux modes (figures 1) :

1) en mode « point de rosée », d'après une analyse de Vanderchmitt (1993) qui aboutit à :

$$\Psi_x = [-\lambda_{\text{eau}(T)}/(V_{\text{eau}} T)] (T - T_r) \quad (\text{équation 5})$$

avec Ψ_x - potentiel hydrique du xylème en un point (ici Ψ_{racines} et Ψ_{tronc}), en Pa ; $\lambda_{\text{eau}(T)}$ - chaleur latente de vaporisation de l'eau en J Mole^{-1} ; R - constante des gaz parfaits, en $\text{J Mole}^{-1} \text{K}^{-1}$; T_r - température de rosée, en $^{\circ}\text{K}$; T - température de l'air, en $^{\circ}\text{K}$; V_{eau} - volume molaire de l'eau, en $\text{m}^3 \text{Mole}^{-1}$.

Figure 1 : Signaux de sorties en mode « point de rosée », « psychrométrie classique » et « psychrométrie combinée » (microvoltmètre à point de rosée de Wescor HR-33T® ; signaux de sortie en microvolt ; temps en secondes). *Chart recording of thermocouple output « dew point », « wet bulb » and « combined » mode (Wescor HR-33T® microvoltmeter).*



2) en mode « psychrométrie classique », avec dans ce cas :

$$\Psi_x = [-\lambda_{\text{eau}}(T)/(V_{\text{eau}} T)] [(p(T) + \gamma)/p(T)](T - T_h) \quad (\text{équation 6})$$

avec Ψ_x – potentiel hydrique du xylème en un point (ici Ψ_{racines} et Ψ_{tronc}), en Pa ; $\lambda_{\text{eau}}(T)$ – chaleur latente de vaporisation de l’eau à la température T , en J Mole^{-1} (à 20°C , $\lambda_{\text{eau}} = 44190 \text{ J Mole}^{-1}$; à 25°C , $\lambda_{\text{eau}} = 43974 \text{ J Mole}^{-1}$) ; V_{eau} – volume molaire de l’eau, en $\text{m}^3 \text{Mole}^{-1}$; T_h – température humide, en $^\circ\text{K}$; T – température de l’air, en $^\circ\text{K}$; $p(T)$ – pression partielle saturante de vapeur d’eau à la température T , en Pa ; γ – constante psychrométrique, en $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$:

$$\gamma = (c_p P)/\lambda (M_{\text{EAU}}/M_{\text{AIR}}) \quad (\text{équation 7})$$

avec c_p - chaleur massique de l’air, en J kg^{-1} ($1,012 \text{ J kg}^{-1}$) ; P - pression atmosphérique, en kPa ; λ - chaleur latente de vaporisation, en J g^{-1} ; M_{EAU} - masse molaire de l’eau, en kg Mole^{-1} ; M_{AIR} - masse molaire de l’air, en kg Mole^{-1} .

La chaleur latente de vaporisation $\lambda_{\text{eau}}(T)$ varie de façon significative avec la température au cours de la journée et ne peut donc pas être considérée comme constante dans le calcul de correction du potentiel hydrique final Ψ_{racines} et Ψ_{tronc} . Sur l’hévée, pendant les deux campagnes de mesures, cette correction s’est effectivement révélée indispensable car les variations de température mesurées étaient de l’ordre de l’écart $T_{\text{air}} - T_{\text{humide}}$ voir $T_{\text{air}} - T_{\text{rosée}}$. Toutefois, cette correction a une limite en pratique. En effet, la courbe de pression de vapeur saturante en fonction de la température définit une zone physiquement interdite : l’hypothèse d’uniformité des concentrations dans la chambre se traduit graphiquement par une droite p/T égale à la constante passant par l’origine et par le point T_c , tel que $p(T_c) = p(T_{rc})$; la température du tissu ne peut être inférieure à une certaine valeur (zone interdite). A cette température limite, le potentiel du tissu (ici le xylème) est alors nul puisque la température du tissu a atteint la température de rosée du tissu.

1.2. Dispositif de mesure du potentiel hydrique

1.2.1. Le potentiel hydrique foliaire - la chambre à pression (Ψ_{feuilles})

La feuille est séparée de la branche au moyen d’une lame de rasoir, à la base du pétiole et introduite dans la chambre à pression. Celle ci mesure la pression hydrostatique négative dans le pétiole de la feuille à partir de l’équilibre entre la pression hydrique de la feuille et la

pression de l'air de la chambre (Ritchie et Hinckley, 1975), équilibre qui se manifeste pour l'observateur par l'apparition de la sève sur la coupure du pétiole, observée à la loupe.

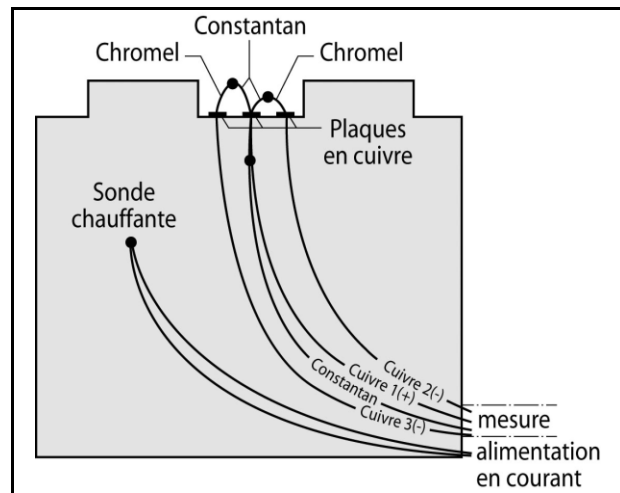
Nous avons utilisé la chambre à pression mise au point par la Société PMS Instrument® (Corvallis, Oregon, USA) ; cette chambre est portable et alimentée par une bouteille d'azote (précision des mesures $\pm 0,5$ bars).

1.2.2. Le potentiel hydrique du xylème (Ψ_{racines} et Ψ_{tronc}) : le micropsychromètre de Dixon-Tyree

Le micropsychromètre de Dixon-Tyree (Stem Psychrometer, Plant Water Status Instruments Inc®, Ontario Canada ; Dixon, 2004 ; figure 2) doit être étalonné et, pour ce faire, relié à un microvoltmètre à point de rosée de Wescor HR-33T®. Deux micropsychromètres sont appliqués au niveau du tronc en deux endroits avant et après la jonction de greffage (Photos 1).

- *Principe physique* : le micropsychromètre (figure 2) utilise le principe du refroidissement par effet Peltier qui repose sur une mesure effectuée en trois temps : 1) mesure de la température de l'air ambiant ; 2) refroidissement par effet Peltier de l'air emprisonné dans la cellule-capteur jusqu'au point de condensation. L'air dans la cellule-capteur est alors saturé de vapeur d'eau et on peut donc déterminer la quantité d'eau du volume de chaque cellule-capteur ; 3) la goutte d'eau s'évapore pour se mettre en équilibre avec le milieu en générant une force électromotrice (f.e.m) que l'on mesure. Le passage de la valeur de la force électromotrice à la valeur de potentiel se fait par une courbe étalon d'équation : $\text{f.e.m.} = a (\Psi_{\text{racines}} \text{ ou } \Psi_{\text{tronc}}) + b$.

Figure 2 : Schéma du micropsychromètre de Dixon-Tyree, vue de profil (Stem Psychrometer, Plant Water Status Instruments Inc®, Ontario Canada). *The Dixon-Tyree stem hygrometer schema, sight of profile (Stem Psychrometer, Plant Water Status Instruments Inc®, Ontario Canada).*

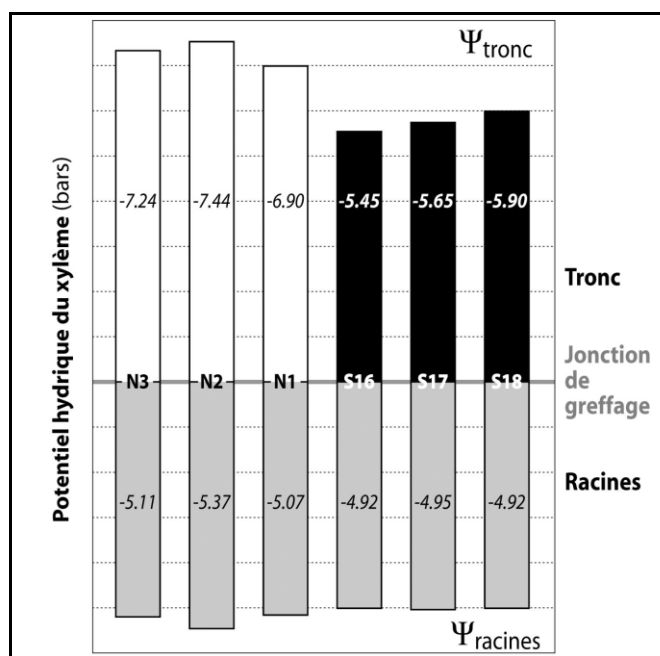


Photos 1 : Préparation du micropsychromètre de Dixon-Tyree pour les mesures de potentiel hydrique du xylème au niveau de la jonction de greffage (Ψ_{tronc} et Ψ_{racines}). *Setting of the Dixon-Tyree stem hygrometer into level of the grafting junction for measurements of xylem water potential (Ψ_{stem} and Ψ_{root} ; bars).*



- *L'étalonnage* se fait en deux temps : 1) réglages intrinsèques aux micropsychromètres en déterminant leur point de rosée à vide (en μV) ; une parfaite étanchéité de la cellule du micropsychromètre est nécessaire à la précision des mesures) ; 2) établissement de la gamme étalon des potentiels hydriques en fonction des concentrations d'une solution titrée de chlorure de potassium (KCl) imbibant des papiers filtres (figure 3), gamme comprise entre 0,05 et 1 Mole litre⁻¹ (pour 20°C : $-230 \text{ J kg}^{-1} < \Psi < -4640 \text{ J kg}^{-1}$) (Dixon, 2004). Les correspondances entre concentrations et potentiels sont établies à l'aide d'une table Wescor®. Pour s'assurer d'un volume d'air toujours identique dans la cellule, l'étanchéité est obtenue en posant du mastic autour des cellules du micropsychromètre. Le temps nécessaire pour équilibrer les solutions et l'air à l'intérieur des cellules du micropsychromètre fermées est de 30 minutes. Les mesures demandent une attention et un soin permanent étant donné la fragilité des thermocouples et la sensibilité des micropsychromètres à tout changement de température (Vanderchmitt, 1993).

Figure 3 : Moyennes journalières du potentiel du xylème (Ψ_{tronc} et Ψ_{racines}) pour les individus « sains » et « nécrosés », pour les périodes du 11 au 22 mai 2004, et du 5 au 18 septembre 2004. *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.*



- *La mise en place des cellules-capteurs :*

(a) matériel végétal - individus hévéa étudiés : des individus « sains » (S) et des individus « nécrosés » (N) ont été choisis et appariés en couple de façon telle

que les deux individus de chaque couple soient proches l'un de l'autre, en ayant donc eu des conditions de croissance similaires et qu'ils soient, au moment des mesures, dans des conditions similaires (lumière, ombre) : trois couples (S-N) ont été ainsi sélectionnés au sein de la placette étudiée.

(b) installation des cellules-capteurs : étant donné qu'il y a écoulement de caoutchouc à l'incision de l'écorce, il est nécessaire de 'vider' la zone autour de l'emplacement du micropsychromètre du caoutchouc qui y est présent, dans le but d'éviter toute gêne pour la mise à l'équilibre, et ce, par scarification du tronc en amont et en aval de l'emplacement des cellules-capteurs (photos 1). Il faut attendre environ 12 heures avant la poursuite de la mise en place des micropsychromètres.

La mesure s'effectue au niveau des tissus conducteurs de sève brute (xylème) par une cellule-capteur qui est une chambre cylindrique de 25 mm de diamètre ; pour pouvoir installer ce capteur, il est nécessaire de décortiquer un petit cercle à l'aide d'un emporte-pièce de 40 mm de diamètre (le diamètre moyen d'un tronc d'hévéa à 1,30 m du sol est de 19 cm ; photos 1). Cette incision doit être bien rincée à l'eau distillée et convenablement séchée ; cette opération doit avoir lieu lorsque l'arbre est en pleine turgescence et transpire le moins possible (*i.e.* en tout début de matinée). L'incision du tronc de l'hévéa doit atteindre la partie active du xylème afin de mesurer le potentiel hydrique réel du tissu conducteur. Avant d'être installé, les bords du capteur sont recouverts de « térostat », mastic étanche, puis mis en force dans le tronc décortiqué (photos 1). Avec ce type de mastic, l'étanchéité est plus satisfaisante qu'avec la graisse silicone préconisée. Le maintien solide du dispositif contre le tronc s'effectue grâce à des rubans « Kraft » bien serrés. L'isolation est réalisée par des sacs isothermes enrobant l'ensemble, le tout recouvert d'une feuille de papier aluminium (photos 1).

- *Les mesures du potentiel hydrique du xylème* : nous renvoyons à la notice d'utilisation de l'appareil (Dixon, 2005), mais deux des trois modes d'utilisation les plus appropriés peuvent être rappelés ici. Il est également conseillé de vérifier fréquemment la batterie du microvoltmètre pour être toujours au-delà de 16 V en valeur absolue (boutons BATT + et -). La procédure est : 1) de mettre en marche le microvoltmètre Wescor 33-HT® (ON) ; 2) de passer en mode lecture de température (READ et T°) et puis de lire la température interne du micropsychromètre ; 3) de passer en mode lecture de tension « CHAMBER » (READ, μ V et C) ; 4) de régler le « ZERO » grâce aux deux boutons prévus à cet effet (ZERO OFFSET) ; 5) de passer en mode lecture de tension « ECHANTILLON » (READ, μ V et S) et puis de lire la f.e.m. d'écart de températures ; 6) de revenir au mode lecture de tension « CHAMBER » (READ, μ V et C).
- (a) mode « point de rosée » : 7) régler le « π_v » en appuyant sur le bouton « π_v » et simultanément en tournant le potentiomètre noté « π_v set » à la valeur déterminée, en fonction de la température lue à l'étape [2] ; 8) actionner le refroidissement pendant quelques secondes (COOL) ; 9) passer en mode lecture du point de rosée (DP), attendre que l'aiguille se stabilise et puis lire la f.e.m. correspondant à l'écart $T_{\text{rosée}} - T_{\text{air}}$; 10) revenir en mode d'attente (INPUT SHORT).
- (b) mode « psychrométrie classique » : 7) actionner le refroidissement pendant quelques secondes (COOL) ; 8) revenir en mode lecture de tension (READ), attendre que l'aiguille se stabilise et puis lire rapidement la f.e.m. correspondant à l'écart $T_{\text{humide}} - T_{\text{air}}$.

Quel que soit le mode choisi, la lecture de la f.e.m. est délicate : il faut observer attentivement le ralentissement de l'aiguille du microvoltmètre au cours de sa descente

(lecture sur un cadran à 30 graduations) et noter la graduation minimale atteinte ; cette lecture doit être rapide car l'aiguille ne reste sur cette graduation qu'une fraction de seconde. Ce mode d'acquisition des données est ici imposé par l'absence d'une centrale enregistrant la cinétique du signal.

2. Résultats et discussion

Les mesures ont été faites lors de deux périodes (mai et septembre 2004), les résultats étant présentés en dissociant les deux périodes de mesure. Les hévés étant greffés, nous appellerons « racines » le compartiment situé en dessous de la jonction de greffage et « tronc » celui situé en dessus de cette jonction (cf. Nizinski *et al.*, 2009 pour commentaires).

2.1. Cinétiques journalières des potentiels hydriques

Notre hypothèse de travail était que des individus « sains » (appelés S) se différencient des individus « nécrosés » (appelés N) par leur potentiel hydrique et par le fait que la jonction de greffage est une résistance supplémentaire (frein) au transfert de l'eau des racines vers le tronc, cette éventuelle différenciation en deux populations nous permettant de tester la fiabilité du micropsychromètre de Dixon-Tyree. La probabilité pour que des mesures erronées dispersées de façon aléatoire permettent de distinguer néanmoins deux populations distinctes, et ce, pour les deux compartiments « tronc » et « racines », tend vers zéro.

Les moyennes journalières du potentiel foliaire (Ψ_{feuilles}) sont respectivement, pour les individus « sains » et « nécrosés » : $\Psi_{\text{feuilles}} = -6,0 (\pm 0,91)$ bars et $\Psi_{\text{feuilles}} = -8,6 (\pm 1,40)$ bars en mai, et $\Psi_{\text{feuilles}} = -6,1 (\pm 1,04)$ bars et $\Psi_{\text{feuilles}} = -7,4 (\pm 1,35)$ bars en septembre, soit un potentiel foliaire des individus « nécrosés » inférieur de 15% (-2,1 bars) à celui des individus « sains » ; ces résultats sont proches de ceux obtenus sur des peuplements comparable (Nizinski *et al.*, 2009). Les moyennes journalières du potentiel du xylème (Ψ_{racines} et Ψ_{tronc}) sont respectivement, pour les individus « sains » et les individus « nécrosés » (figure 3) :

- **pour les racines :**
 - $\Psi_{\text{racines}} = -3,9$ bars et $\Psi_{\text{racines}} = -4,2$ bars, en mai ;
 - $\Psi_{\text{racines}} = -4,9 (\pm 0,09)$ bars et $\Psi_{\text{racines}} = -5,2 (\pm 1,10)$ bars, en septembre.
- **pour les troncs :**
 - $\Psi_{\text{tronc}} = -4,6 (\pm 0,87)$ bars et $\Psi_{\text{tronc}} = -5,6 (\pm 1,32)$ bars, en mai ;
 - $\Psi_{\text{tronc}} = -5,6 (\pm 1,09)$ bars et $\Psi_{\text{tronc}} = -7,2 (\pm 0,97)$ bars, en septembre.

Pour les racines, le potentiel hydrique des individus « nécrosés » n'est inférieur que de 5 à 6% (0,3 bars) à celui des individus « sains », alors que pour les troncs, il est inférieur de 20 à 22% (1-1,2 bars). On teste ensuite l'hypothèse statistique que les individus « sains » se différencient des individus « nécrosés ». Pour le potentiel hydrique foliaire (Ψ_{feuilles}), nous disposons, à l'échelle de la parcelle, de 388 données réparties en 15 séries sur 12 jours (tableau 1), permettant de comparer trois arbres « nécrosés » (N1, N2, N3) et trois arbres « sains » (S16, S17, S18). La distribution de ces données pour la variable Ψ_{feuilles} est normale, et s'étend de 3 à 13 bars, avec une moyenne générale de 6,8 bars et des moyennes par série variant entre 5,3 et 8,7 bars. L'analyse statistique montre une forte interaction entre les séries de mesures et les arbres : il n'est donc pas possible de regrouper les séries et il convient de les examiner une par une.

Tableau 1 : Niveaux de signification des potentiels hydriques foliaires des six arbres étudiés (N1, N2, N3, S16, S17 et S18) pour chacune des quinze séries de mesures, pour les individus « sains » et les individus « nécrosés » (A = potentiel hydrique le plus fortement négatif ; B = indicateur de frein hydrique plus élevé). *For the six studied trees (N1, N2, N3, S16, S17 and S18) the levels of significance the leaf water potentials (Ψ_{leaf}) for each of the fifteen series of measurements of the « healthy » and of « necrosed » trees (A = the leaf water potential most strongly negative; B = indicator of higher hydraulic resistance of the plant to waterflow, from root's xylem to stem's xylem through grafting junction).*

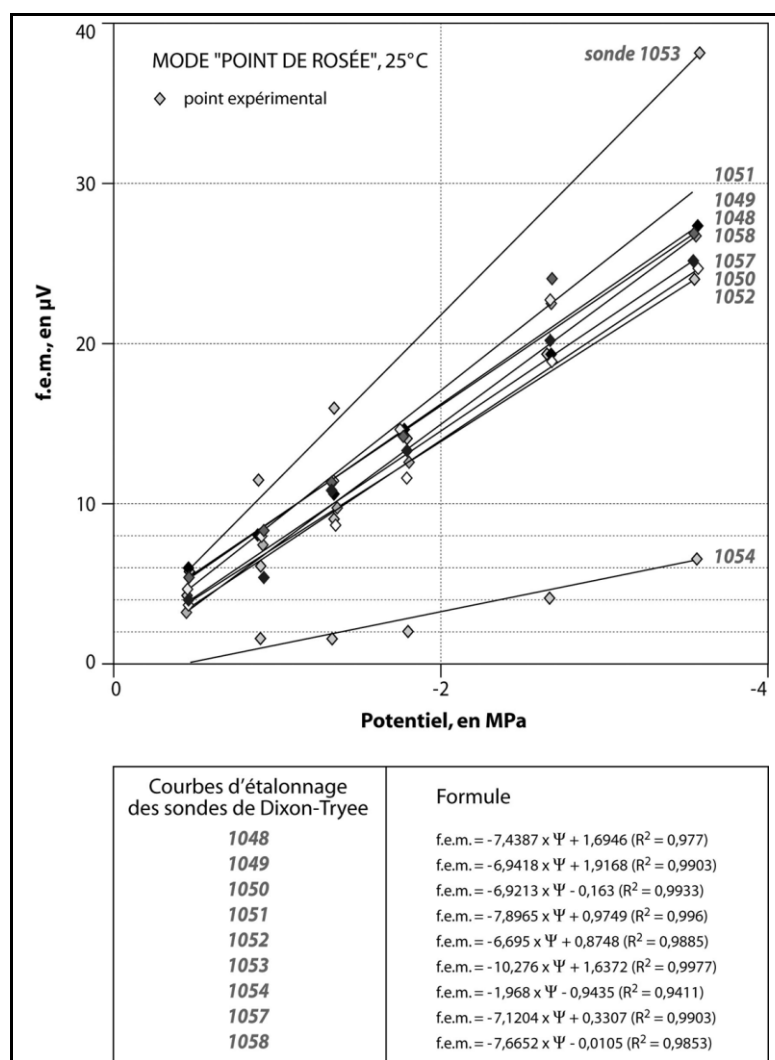
Série	Arbre						Confirmation hypothèse
	N1	N2	N3	S16	S17	S18	
1			A	B			Oui
2	A	A	A	A	A	A	Neutre
3	A	A	A	B		B	Oui
4			A	B		B	Oui
5	A	AB	A	AB	AB	B	Partielle
6	AB	A	A	AB	B	B	Partielle
7	AB	A		AB	B	AB	Partielle
8	B	AB		B	B	A	Neutre
9	A	A	A	A	A	A	Neutre
10	AB	A	A	AB	B	B	Partielle
11	AB	A	B	B		B	Partielle
12	A	B	B	B	B	B	Partielle
13	A	A	A	A	A	A	Neutre
14	A	AB	A	AB	B	B	Partielle
15	A	A	A	A	A	A	Neutre

Arbre	Nombre de données	$\Psi_{racines} - \Psi_{tronc}$	Signification	Niveau de signification
N3	16	1,64	A	0,0002
N2	16	1,56	A	
N1	16	1,41	A	
S17	16	0,65	B	
S16	16	0,49	B	

Le tableau 1 indique que cinq séries ne fournissent pas d'indication en faveur ou en défaveur de l'hypothèse initiale (résultat neutre), tandis que dix séries conforte plus ou moins bien l'hypothèse. Aucune série ne va dans le sens opposé à l'hypothèse de départ, *i.e.* la différenciation des individus « sains » et des individus « nécrosés ». L'hypothèse peut donc être considérée comme validée dans la mesure où la forte variabilité du phénomène et la faiblesse de l'échantillonnage tendent à atténuer le phénomène observé (réduction de la puissance du test) : les individus « nécrosés » ont enregistré le potentiel foliaire significativement inférieur à celui des individus « sains ».

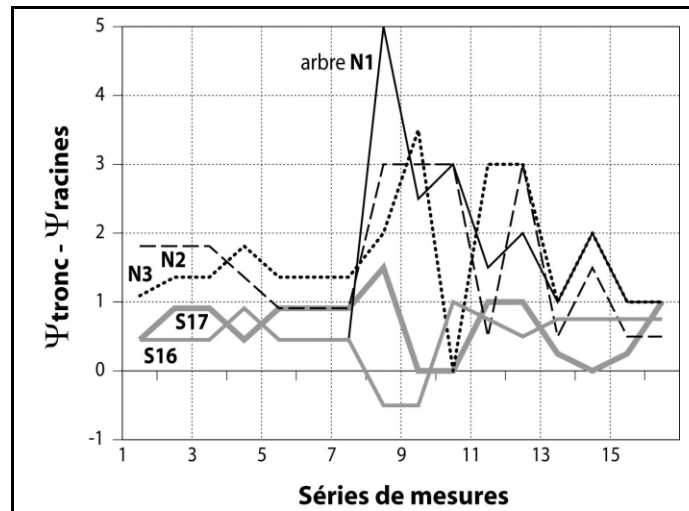
Pour le potentiel hydrique du xylème du tronc (Ψ_{tronc}) et des racines ($\Psi_{racines}$), les données analysées concernent six arbres (tableau 1) : N1, N2 et N3 (« nécrosés ») et S16, S17 et S18 (« sains »). Nous ne disposons que d'un couple de sondes par arbre ; nous n'avons donc pas estimé la variabilité intra-arbre de ces potentiels hydriques pour chacun des deux compartiments « tronc » et « racines ». Les données analysées sont les mesures brutes, avant leur transformation selon les courbes de d'étalonnage de chaque capteur (figure 4). Elles proviennent de seize séries de mesures sur cinq arbres, soit 80 mesures du potentiel Ψ_{tronc} , et 80 mesures du potentiel $\Psi_{racines}$, donc 80 différences entre potentiel hydrique du xylème du tronc et potentiel hydrique des racines.

Figure 4 : Courbes d'étalonnage du micropsychromètre de Dixon-Tyree mode « point de rosée ». *The calibration curves of the Dixon-Tyree stem hygrometer « dew point ».*



Le tableau 1 et la figure 5 présentent, pour les cinq arbres (N1, N2, N3, S16 et S17), les variations de la différence de potentiel hydrique du xylème ($\Psi_{\text{tronc}} - \Psi_{\text{racines}}$) au cours des 16 séries étudiées. Le fait de ne disposer que d'une mesure ($\Psi_{\text{tronc}} - \Psi_{\text{racines}}$) par arbre et par série empêche d'évaluer l'interaction séries *versus* arbres. Une différence significative apparaît entre les arbres nécrosés et les arbres sains, avec une différence de potentiel entre racines et tronc nettement plus forte pour les individus « nécrosés » que pour les individus « sains », validant ainsi notre hypothèse de travail : il existe une résistance plus élevée au passage de l'eau au travers de la jonction de greffage chez les individus « nécrosés ».

Figure 5 : Variations de la différence de potentiel hydrique du xylème ($\Psi_{\text{tronc}} - \Psi_{\text{racines}}$) au cours des seize séries des cinq arbres étudiés (N1, N2, N3, S16 et S17). *Variations of the xylem water potential gradient ($\Psi_{\text{stem}} - \Psi_{\text{root}}$) during sixteen series of the five studied trees (N1, N2, N3, H16 and H17).*



2.2. Potentiels hydriques de base

Les potentiels hydriques de base rendent compte de l'équilibre entre potentiel hydrique du sol et potentiel hydrique des racines qui s'établit pendant la nuit, période sans transpiration et qui tendent, sans nécessairement l'atteindre, vers le potentiel hydrique du sol. En période d'absence de contrainte hydrique du sol, comme c'est le cas pour les deux périodes de mesures durant lesquelles le sol est à la capacité au champs ($\Psi_{\text{sol}} < 0,1$ bars), le rééquilibrage entre les différents compartiments de la plante, feuilles-tronc-racines, est optimal, et donc les potentiels hydriques de base des racines-tronc-feuilles ne devraient pas différer. Ainsi, la comparaison des potentiels hydriques de base des racines et du tronc, mesurés avec le micropsychromètre de Dixon-Tyree et des potentiels foliaires de base, mesurés avec la chambre à pression, nous permet de valider ou non les mesures faites avec le micropsychromètre de Dixon-Tyree. Nous obtenons les résultats suivants :

- **pour les individus « sains » :**

- en mai $\Psi_{\text{feuilles}} = -3,2$ bars, $\Psi_{\text{tronc}} = -4,1$ bars et $\Psi_{\text{racines}} = -4,1$ bars ;
- en septembre $\Psi_{\text{feuilles}} = -3,8$ bars, $\Psi_{\text{tronc}} = -4,0$ bars et $\Psi_{\text{racines}} = -4,0$ bars.

- **pour les individus « nécrosés » :**

- en mai $\Psi_{\text{feuilles}} = -3,6$ bars, $\Psi_{\text{tronc}} = -4,1$ bars et $\Psi_{\text{racines}} = -4,1$ bars ;
- en septembre $\Psi_{\text{feuilles}} = -3,4$ bars, $\Psi_{\text{tronc}} = -4,0$ bars et $\Psi_{\text{racines}} = -4,0$ bars.

Pour tout individu, il existe une différence systématique de 0,2 à 0,9 bars, entre le potentiel hydrique de base des feuilles et les potentiels hydriques de base du tronc et des racines, le potentiel hydrique de base des feuilles étant inférieur à celui du tronc ou des racines. Cette différence systématique de 0,2 à 0,9 bars nous permet d'estimer comme valides les mesures faites avec le micropsychromètre de Dixon-Tyree, ce qui n'aurait pas été le cas si cette différence avait présenté un caractère aléatoire. Par ailleurs, le fait que cette différence systématique soit du même ordre de grandeur que la précision des mesures de la chambre à pression ($\pm 0,5$ bars) conforte la validation des mesures avec le micropsychromètre de Dixon-Tyree. Quelle est la signification d'un tel résultat : 1) soit cette différence rend compte d'une erreur de calage de l'appareil (calage ou calibrage, dépendant des caractéristiques de l'appareil, ici Wescor 33-HT®) : dans ce cas, le phénomène réel serait qu'il n'existe pas de différence entre le potentiel hydrique de base des feuilles et les potentiels hydriques de base du tronc et des racines, quel que soit l'individu ; 2) soit cette différence rend compte du phénomène réel, et dans ce cas, les individus « nécrosés » se comportent comme des individus « sains ».

Malgré une résistance élevée au passage de l'eau à travers la jonction de greffage pour les « nécrosés », la durée de la nuit est néanmoins suffisante pour que le rééquilibrage des potentiels se fasse de la même façon que pour les individus « sains ». Les mesures ont été faites lors de deux périodes similaires en termes de disponibilité en eau, l'étude doit donc se poursuivre sur des périodes contrastées de disponibilité en eau. Nous pouvons supposer qu'en fin de saison sèche, pour des potentiels hydriques très négatifs, le rééquilibrage des potentiels soit moindre encore dans le cas des individus « nécrosés » que dans celui des individus « sains ». Quoiqu'il en soit, des mesures idéales supposeraient de mesurer en continu, avec une résolution temporaire d'une heure, les potentiels foliaires de base et les potentiels hydriques de base du xylème du tronc sur toute la hauteur du tronc jusqu'aux dernières branches (par exemple, une mesure tous les mètres).

Durant nos mesures, nous avons constaté une remontée du potentiel hydrique du xylème en début de matinée, vraisemblablement liée à la rosée déposée sur le tronc de l'hévéa (sinon, elle serait liée à un défaut de conception de l'appareil). Vers midi, nous observons une forte chute du potentiel, moment durant lequel effectivement le potentiel du xylème s'éloigne le plus du potentiel hydrique des feuilles, mais il nous est impossible de savoir qu'elle est la marge d'erreur pour ces mesures.

La bibliographie traitant du sujet est rare (Vanderchmitt, 1993). Les comparaisons de potentiel hydrique obtenu par micropsychromètre et par chambre à pression sont nombreuses mais déterminées en conditions contrôlées, avec une température de l'air stabilisée. Même dans ces conditions, les études sont incomplètes. Garnier et Berger (1985) préconisent l'utilisation d'une chambre à pression sur feuille équilibrée à l'intérieur d'un sachet plastique recouvert d'aluminium pour obtenir un potentiel hydrique des feuilles équivalent au potentiel hydrique du xylème. Un tel dispositif ne peut s'imaginer qu'en conditions contrôlées ou semi-contrôlées, sur des individus de petite taille avec peu de feuilles, mais évidemment pas en conditions *in situ*.

2.3. Bilan des travaux effectués

A partir de ces résultats, nous pouvons établir une liste des manipulations nécessaires à une future bonne utilisation du micropsychromètre de Dixon-Tyree :

- 1) La mesure du potentiel hydrique du xylème par micropsychromètre a l'avantage de ne pas être destructive si le capteur est bien installé, ce dernier pouvant être laissé en place deux semaines sans problème ; il s'agirait d'étudier maintenant pendant combien de temps il peut rester en place avant que la cicatrisation des tissus n'altèrent les mesures.
- 2) La mesure étant basée sur des lectures de tension, il est possible d'automatiser le procédé (Valancogne et Daudet, 1974). Néanmoins, la difficulté réside dans le fait qu'il s'agit de faibles tensions et, dans ce cas (de l'ordre du nanoVoltes – potentiels élevés), celles-ci ne sont pas facilement mesurées de façon fiable par les dispositifs d'acquisitions de données existants. L'idéal serait de faire en parallèle une lecture visuelle et l'acquisition automatique des données. L'acquisition automatique des données est par ailleurs incontournable si on veut des mesures de potentiel hydrique en continu sur plusieurs jours entiers consécutifs ; elle peut très facilement être envisagée pour des potentiels très négatifs avec une très faible disponibilité en eau du sol, en culture semi-contrôlées.
- 3) Les valeurs issues des premières journées de mesure furent parfois erronées, l'équilibrage a exigé une attente d'un minimum de quatre heures. Il est donc préférable d'attendre le lendemain pour commencer réellement les mesures. Lors de nos deux campagnes de mesures, les capteurs ont offert plus de 15 jours de résultats satisfaisants.

4) Lors d'une mesure, il est impératif d'assurer au mieux l'étanchéité et l'isolation thermique de la cellule-capteur : en effet, l'humidité relative dans la chambre est toujours proche de la saturation, une variation de température même minime aura donc une incidence importante, et l'air extérieur ne doit pas venir modifier l'humidité relative de l'air de la chambre.

5) La sortie du capteur (en bout du câble) est de type « attache rapide », ce qui facilite les répétitions de lecture sur le microvoltmètre à point de rosée Wescor HR-33T®. Des deux modes de lecture, mode « point de rosée » et mode « psychrométrie classique », le premier a été privilégié en raison de sa plus grande sensibilité et d'une lecture plus aisée. Toutefois, l'utilisation de ce mode a une limite correspondant à une constante de refroidissement π_v ne dépassant pas 92,5 ; au-delà, il faut passer au mode psychromètre classique.

Conclusion et perspectives

L'utilisation *in situ* du micropsychromètre de Dixon-Tyree en est encore au stade expérimental : avant donc de l'utiliser en routine, il convient de travailler sur des individus dont on maîtrise le maximum de caractéristiques physiologiques, à savoir sur des individus cultivés dont on contrôle la disponibilité en eau du sol : ce n'est que dans de telles conditions que la comparaison chambre à pression – micropsychromètre de Dixon-Tyree débouchera sur un éventuel recalage des mesures et/ou sur un éventuel réajustement de la notion de potentiel hydrique de base.

In situ, l'utilisation de l'acquisition automatique des données s'impose pour avoir des mesures en continu, mais nous conseillons de l'utiliser parallèlement à des lectures visuelles pour éliminer des mesures parasites dont nous ne comprenons pas encore totalement le déterminisme. En effet, seul le suivi visuel d'une dynamique (figure 1), pour des conditions micrométéorologiques déterminées, permet de juger du caractère aberrant de certaines mesures. Par ailleurs, sachant que le contrôle de la température de mesure est un des critères qui conditionne la justesse des mesures, pour un suivi en continu (donc avec une température extérieure qui évolue sur 24 heures), des interventions manuelles doivent être régulièrement prévues.

Remerciements : Ce programme a été financé par l'Institut Français du Caoutchouc (Michelin-SIPH-SOCFINCO). Nous remercions la Direction Générale de la SAPH, le personnel de la plantation de Bongo (Côte d'Ivoire) et Chantal Fresneau (Université de Paris-Sud, Orsay) de leur aide.

Bibliographie

BRUCKLER 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 pages.

GARNIER E. et BERGER A., 1985 : Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. *Journal of Applied Ecology*, 23, 193-209.

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

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

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

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

VALANCOGNE C. et 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. *Annales agronomiques*, 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 pages.