

L'INTERET DE L'UTILISATION *IN SITU* DES MICROPSYCHROMETRES DE DIXON-  
TYREE EN BIOCLIMATOLOGIE: CAS D'UNE PLANTATION D'HEVEA EN COTE  
D'IVOIRE

Jerzy J. NIZINSKI<sup>(1)</sup>, Anh GALAT-LUONG, Gérard GALAT et Jean-Paul LHOMME

<sup>(1)</sup> Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Unité de Recherche « Climat et fonctionnement des agro-écosystèmes – rôle de l'agrobiodiversité dans la stabilité de la production » - UR 060 CLIFA, Centre IRD de Montpellier, 911 avenue Agropolis, B.P. 64501, 34394 Montpellier cedex 5, téléphone: 04-67-41-61-00, fax: 04-67-41-63-30, e-mail: georges.nizinski@ird.fr

## 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*. Nous avons utilisé le micropsychromètre de Dixon-Tyree (potentiel hydrique du xylème du tronc et des racines) et la chambre à pression (potentiel foliaire) pour 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 dont nous faisons la liste. Ce travail renvoie à un éventuel recollage des mesures et/ou un éventuel réajustement de la notion de 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'équilibrage 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.

**Key-words**: stem psychrometers, leaf water potential, stem xylem potential hydraulic conductance of a stem, *Hevea brasiliensis*, Côte d'Ivoire

## 1. 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. 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 poser l'hypothèse de l'association de la nécrose à un potentiel hydrique plus négatif chez les arbres nécrotiques, indiquant un problème d'accès à l'eau (racines) ou de conduite de l'eau (xylème).

Nous avons étudié les transferts hydriques dans des plantations d'hévéas en Côte d'Ivoire en considérant le sol, l'individu hévéa et l'atmosphère comme une entité physique dans laquelle les processus mis en œuvre pour la circulation de l'eau sont interdépendants. Ces hévéas 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 portent 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, au laboratoire; les travaux *in situ* et sur des peuplements ligneux sont récents et peu nombreux (Vanderchmitt, 1993).

## 2. Matériel et méthodes

**2.1. Théorie des mesures du potentiel hydrique à l'aide d'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 mesure le potentiel hydrique ; pour le micropsychromètre de Dixon-Tyree (Dixon, 2004) le potentiel hydrique en tout point du tissu mesuré est proportionnel à la différence de température entre température de l'air (T) et température de rosée de l'air en ce point (T<sub>r</sub>) (Bruckler, 1984).

Le potentiel hydrique théorique d'un tissu végétal rend compte des potentiels de pression dû à la pression de l'eau contre les parois des cellules et à la pression de l'eau dans les vaisseaux, du potentiel osmotique dû à la présence de substances dissoutes dans l'eau des cellules, du potentiel matriciel dû aux phénomènes capillaires et aux phénomènes de tension superficielle de l'eau et enfin du potentiel gravitaire. Le potentiel hydrique en un point d'un végétal peut s'exprimer en énergie par unité de masse (en J kg<sup>-1</sup>) ; cette formulation est celle employée par les physiologistes pour sa simplicité et pour le fait qu'il y a équivalence avec une pression (en Pa). Ce potentiel s'exprime par :

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

Avec :  $\Psi_x$  – potentiel hydrique du xylème en un point (ici  $\Psi_{\text{racines}}$  et  $\Psi_{\text{tronc}}$ ), en J kg<sup>-1</sup> ou en Pa ; R – constante des gaz parfaits, en J Mole<sup>-1</sup> °K<sup>-1</sup> (8,31 J Mole<sup>-1</sup> °K<sup>-1</sup>) ; T – température de l'air, en °K ; V<sub>eau</sub> – volume molaire de l'eau, en m<sup>3</sup> Mole<sup>-1</sup> (18,10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> Mole<sup>-1</sup>) ; p – pression partielle actuelle de vapeur d'eau à la température T, en Pa ; p<sub>(T)</sub> – 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 psychromètre.

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. La loi de Fick s'applique :

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

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

L'équilibre est donc synonyme d'uniformité des concentrations en vapeur d'eau dans toute la chambre du psychromètre. D'après la loi des gaz parfaits, la concentration en vapeur d'eau s'écrit sous la forme :

$$C_e = n_e/V = p/(R T)$$

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  $^{\circ}K$  ;  $R$  - constante des gaz parfaits, en  $J Mole^{-1} ^{\circ}K^{-1}$  ( $R=8,31 J Mole^{-1} ^{\circ}K^{-1}$ ).

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 :

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

Avec :  $p_t$  - pression partielle actuelle de vapeur d'eau à la température du tissu (xylème)  $T_t$ , en Pa ;  $T_t$  - température du tissu végétal (xylème), en  $^{\circ}K$  ;  $p_c$  - 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  $^{\circ}K$  ;  $p(T_{rc})$  - pression partielle saturante de vapeur d'eau à la température  $T_{rc}$  du point de mesure dans la chambre, en Pa.

Les mesures effectuées par le psychromètre sont celles de: (a) la température dans la chambre en tous points, donc au point de mesure,  $T_c$  ; (b) la température de rosée en ce point de mesure,  $T_{rc}$  ; (c) la température du tissu  $T_t$ .

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

(a) en mode « point de rosée », on a alors :

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

Avec :  $\Psi_x$  - potentiel hydrique du xylème en un point (ici  $\Psi_{racines}$  et  $\Psi_{tronc}$ ), en Pa ;  $\lambda_{eau(T)}$  - chaleur latente de vaporisation de l'eau en  $J Mole^{-1}$  (à  $20 ^{\circ}C$ ,  $\lambda_{eau} = 44190 J Mole^{-1}$  ; à  $25 ^{\circ}C$ ,  $\lambda_{eau} = 43974 J Mole^{-1}$ ) ;  $R$  - constante des gaz parfaits, en  $J Mole^{-1} ^{\circ}K^{-1}$  ( $R=8,31 J Mole^{-1} ^{\circ}K^{-1}$ ).

<sup>1</sup>);  $T_r$  – température de rosée, en °K ;  $T$  – température de l’air, en °K ;  $V_{\text{eau}}$  – volume molaire de l’eau, en  $\text{m}^3 \text{Mole}^{-1}$  ( $18,10^{-6} \text{m}^3 \text{Mole}^{-1}$ ).

(b) en mode psychrométrie classique, on a alors :

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

Avec :  $\Psi_x$  – potentiel hydrique du xylème en un point (ici  $\Psi_{\text{racines}}$  et  $\Psi_{\text{tronc}}$ ), en Pa ;  $\lambda_{\text{eau}(T)}$  – chaleur latente de vaporisation de l’eau à la température  $T$ , en  $\text{J Mole}^{-1}$  (à 20 °C,  $\lambda_{\text{eau}} = 44190 \text{J Mole}^{-1}$  ; à 25 °C,  $\lambda_{\text{eau}} = 43974 \text{J Mole}^{-1}$ ) ;  $V_{\text{eau}}$  - volume molaire de l’eau, en  $\text{m}^3 \text{Mole}^{-1}$  ( $18,10^{-6} \text{m}^3 \text{Mole}^{-1}$ ) ;  $T_h$  - température humide, en °K ;  $T$  – température de l’air, en °K ;  $p_{(T)}$  - pression partielle saturante de vapeur d’eau à la température  $T$ , en Pa ;  $\gamma$  – constante psychrométrique, en  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$  :

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

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

La chaleur latente de vaporisation ( $\lambda_{\text{eau}(T)}$ ) varie de façon significative avec la température au cours de la journée et doit être conservée comme telle dans le calcul de correction du potentiel hydrique final ( $\Psi_{\text{racines}}$  et  $\Psi_{\text{tronc}}$ ).

Sur l’hévéa pendant les deux campagnes de mesures, cette correction s’est révélée indispensable car les gradients thermiques mesurés 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 d’application. 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 par une droite  $p/T = \text{constante}$  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. Autrement dit, les conditions de validité de la correction correspondent à un potentiel hydrique final du tissu toujours négatif ou nul.

## **2.2. Dispositif de mesure du potentiel hydrique**

a) Potentiel hydrique foliaire - la chambre à pression ( $\Psi_{\text{feuilles}}$ ). 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 S<sup>té</sup> PMS Instrument® (Corvallis, Oregon, USA) ; cette chambre est portable et alimentée par une bouteille d’azote (précision des mesures  $\pm 0,5$  bars).

b) Potentiel hydrique du xylème ( $\Psi_{\text{racines}}$  et  $\Psi_{\text{tronc}}$ ) - le micropsychromètre de Dixon-Tyree : le micropsychromètre de Dixon-Tyree (Stem Psychrometer, Plant Water Status Instruments Inc®, Ontario Canada) (Dixon, 2004) (Figure 1) doit être étalonné et pour ce faire, être 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 1a, 1b, 1c).

- *Principe*: le micropsychromètre (Figure 2) utilise le principe du refroidissement par effet Pelletier. La mesure s'effectue en trois temps: (1) mesure de la température de l'air ambiant; (2) refroidissement par effet Pelletier de l'air emprisonné dans la cellule-capteur jusqu'au point de condensation. La vapeur dans la cellule-capteur est saturante, 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:  $f.e.m. = a (\Psi_{\text{racines}} \text{ ou } \Psi_{\text{tronc}}) + b$ .
- *Étalonnage*: l'étalonnage des micropsychromètres se fait en deux temps (1) réglages intrinsèques aux micropsychromètres en déterminant leur point de rosée à vide (en  $\mu\text{V}$ ) (l'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 KCl (Figure 3) imbibant des papiers filtres, gamme comprise entre 0 et 1 Mole litre<sup>-1</sup>. Les correspondances concentrations - potentiels sont établies à l'aide d'une table Wescor®. Pour s'assurer un volume d'air toujours identique dans la cellule, l'étanchéité est obtenue en posant du mastic autour des cellules du micropsychromètre. Le temps imparti défini pour équilibrer les solutions et l'air à l'intérieur des cellules du micropsychromètre fermées est de 30 minutes. Les mesures ne sont pas compliquées mais 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).
- *Mise en place des cellules-capteurs*:
  - (a) matériel végétal - individus hévéa étudiés: des individus « sains » et des individus « nécrosés » ont été choisis et appariés en couple de façon telle que les deux individus de chaque couple soient proches l'un de l'autre, aient donc eu des conditions de croissance similaires et soient, au moment des mesures, dans des conditions similaires (lumière, ombre): il y a trois couples (S-N) 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 et ce, par scarification du tronc en amont et en aval de l'emplacement des cellules-capteurs (Photo 1a). 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. 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 (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 (Photo 1b). 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 (Photo 1c).

- *Mesures du potentiel hydrique du xylème*: Il est conseillé de vérifier fréquemment la batterie du microvoltmètre pour être toujours au-delà de 16 V en valeur absolue (boutons BATT + et -). Procédure : 1) mettre en marche le microvoltmètre Wescor 33-HT® (ON) ; 2) passer en mode lecture de température (READ et T °) et puis lire la température interne du micropsychromètre ; 3) passer en mode lecture de tension « CHAMBER » (READ,  $\mu\text{V}$  et C) ; 4) régler le « ZERO » grâce aux deux boutons prévus à cet effet (ZERO OFFSET) ; 5) passer en mode lecture de tension « ECHANTILLON » (READ,  $\mu\text{V}$  et S) et puis lire la f.e.m. d'écart de températures ; 6) revenir au mode lecture de tension « CHAMBER » (READ,  $\mu\text{V}$  et C).
  - (a) mode « point de rosée » : 7) régler le «  $\pi_v$  » en appuyant sur le bouton «  $\pi_v$  » et simultanément en tournant le potentiomètre noté «  $\pi_v$  set » à la valeur déterminée, en fonction de la température lue à l'étape [2] ; 8) actionner le refroidissement pendant quelques secondes (COOL) ; 9<sup>ème</sup>) 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 psychrométrique 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 (« point rosée » ou classique), la lecture de la f.e.m. est délicate : 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 était ici imposé par l'absence d'une centrale enregistrant la cinétique du signal.

### 3. Résultats et discussion

Les mesures ont été faites lors de deux périodes (mai et septembre 2004), nous avons volontairement présentés les résultats en dissociant les deux périodes bien que ces deux périodes ne se différencient pas.

Les hévéa sont greffés, nous appellerons « racines » le compartiment situé en dessous de la jonction de greffage et « tronc » celui situé en dessus de cette jonction (voir Nizinski *et al.*, 2009 pour commentaires).

**3.1. Cinétiques journalières des potentiels hydriques** : nous avons choisi deux catégories d'hévéas qui se distinguent par leur état physiologique : des individus « sains » (appelés S) et des individus « nécrosés » (appelés N), avec comme hypothèse de travail qu'ils se

différencient par leur potentiel hydrique, que la jonction de greffage soit une résistance supplémentaire (frein) au transfert de l'eau des racines vers le tronc ; cette éventuelle différenciation en deux populations permettra de tester un aspect de 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* ( $\Psi_{\text{feuilles}}$ ) 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* ( $\Psi_{\text{racines}}$  et  $\Psi_{\text{tronc}}$ ) sont respectivement pour les individus « sains » et les individus « nécrosés » (Figure 3):
  - a) 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 ;
  - b) 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 5-6 % (0,3 bars) à celui des individus « sains » ; alors que pour les troncs il est inférieur de 20-22 % (1-1,2 bars).

**Analyses statistiques :** On teste l'hypothèse que les individus « sains » se différencient des individus « nécrosés »

\* *potentiel hydrique foliaire* ( $\Psi_{\text{feuilles}}$ ) (Tableau 1) : on dispose sur la parcelle de 388 données réparties en 15 séries sur 12 jours permettant de comparer trois arbres « nécrosés » (N1, N2, N3) et trois arbres « sains » (S16, S17, S18). La distribution de ces données pour la variable  $\Psi_{\text{feuilles}}$  est normale, et s'étend de 3,0 à 13,0 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.

Le tableau 1 indique que cinq séries ne fournissent pas d'indication en faveur ou en défaveur de l'hypothèse (résultat neutre), tandis que dix séries conforte plus ou moins bien l'hypothèse. Aucune série ne va dans le sens opposé à l'hypothèse, l'hypothèse de départ, la différenciation des individus « sains » et des individus « nécrosés ». L'hypothèse peut 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 eu le potentiel foliaire significativement inférieur à celui des individus « sains ».

\* *potentiel hydrique du xylème du tronc* ( $\Psi_{\text{tronc}}$ ) *et des racines* ( $\Psi_{\text{racines}}$ ) (Tableau 1) : les données analysées concernent cinq arbres, N1, N2 et N3 (« nécrosés ») et S16 et S17



(« sains »). On ne dispose que d'un couple de sondes par arbre ; on n'a 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 3). Elles proviennent de seize séries de mesures sur cinq arbres, soit 80 mesures du potentiel  $\Psi_{\text{tronc}}$ , et 80 mesures du potentiel  $\Psi_{\text{racines}}$ , soit 80 différences entre potentiel hydrique du xylème du tronc et potentiel hydrique des racines.

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. 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 x arbres. La comparaison statistique des cinq arbres sur le regroupement des seize séries fait passer l'interaction dans la résiduelle. Malgré cela, 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 » (Nizinski *et al.*, 2009).

**3.2. Potentiels hydriques de base:** les potentiels hydriques de base rendent compte de l'équilibre potentiel hydrique du sol – potentiel hydrique des racines qui s'établit pendant la nuit, période sans transpiration et tendent, sans nécessairement l'atteindre, vers le potentiel hydrique du sol.

En période de non contrainte hydrique du sol, comme c'est le cas pour les deux périodes de mesures où 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 permettra 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 de 0,2 à 0,9 bars est du même ordre de grandeur que la précision des mesures de la chambre à pression ( $\pm 0,5$  bars), ainsi dans un premier temps, nous pouvons nous permettre d'estimer valides les mesures faites avec le micropsychromètre de Dixon-Tyree ; nous estimerons donc que les mesures rendent bien compte d'un rééquilibrage des différents compartiments pour les individus « sains », mais aussi pour les individus « nécrosés » : malgré une résistance élevée au passage de l'eau à travers la jonction de greffage, 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 ».

Dans un second temps, nous devons expliciter cette différence systématique de 0,2 à 0,9 bars : tout d'abord un tel biais systématique renvoie non pas à la précision des mesures par le micropsychromètre mais à leur calage (ou calibrage), dépendant des caractéristiques de l'appareil (ici Wescor 33-HT®) ; ainsi, a) si on suppose que ce biais correspond à une erreur de mesure du phénomène, alors il faut revoir le calage de l'appareil ; b) si, *a contrario*, on suppose que les mesures par le micropsychromètre correspondent au phénomène réel, c'est la notion de potentiel de base qu'il faut revoir.

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).

**3.3. Quelques caractéristiques des mesures au micropsychromètre de Dixon-Tyree:** nos résultats offrent deux singularités, une en début et l'autre en milieu de journée. On constate une remontée du potentiel hydrique du xylème en début de matinée, vraisemblablement liée à la rosée déposée sur le tronc de l'hévéa, on se trouverait alors en face d'un défaut de conception de l'appareil. Vers midi, on constate une forte chute du potentiel, moment où 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 très peu riche (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 *in situ*.

Nous allons faire 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 peut être laissé en place deux semaines sans problème ; il s'agirait d'étudier 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 que, dans le cas de très faibles tensions (de l'ordre du nanoVoltes – potentiels élevés), celles-ci ne sont pas toujours lues de façon fiable par les dispositifs d'acquisitions de données (problématique électronique). 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 ; cette acquisition automatique peut très facilement être envisagée pour des potentiels très négatifs en conditions de 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 psychrométrique 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  $\pi_v$  ne dépassant 92,5, au-delà il faut passer au mode psychromètre classique.

#### **4. Conclusion et perspectives**

Nous avons établi une liste de recommandations concernant l'utilisation du micropsychromètre de Dixon-Tyree, les manipulations sont délicates mais néanmoins faciles à mettre en œuvre.

L'utilisation *in situ* du micropsychromètre de Dixon-Tyree en est encore au stade expérimental : avant donc de l'utiliser *in situ*, 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 micro météorologiques 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 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

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 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.

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* (sous presse).

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.

## Tableaux, figures et photos

**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).

**Figure 1** - Signaux de sorties en mode (a) « point de rosée » ; (b) psychrométrie classique ; (c) psychrométrie combinée (microvoltmètre à point de rosée de Wescor HR-33T®).

**Figure 2** – Schéma du micropsychromètre de Dixon-Tyree, vue de profil (Stem Psychrometer, Plant Water Status Instruments Inc®, Ontario Canada).

**Figure 3** – Moyennes journalières du potentiel du xylème ( $\Psi_{\text{tronc}}$  et  $\Psi_{\text{racines}}$ ) pour les individus « sains » et « nécrosés », en mai et en septembre 2004.

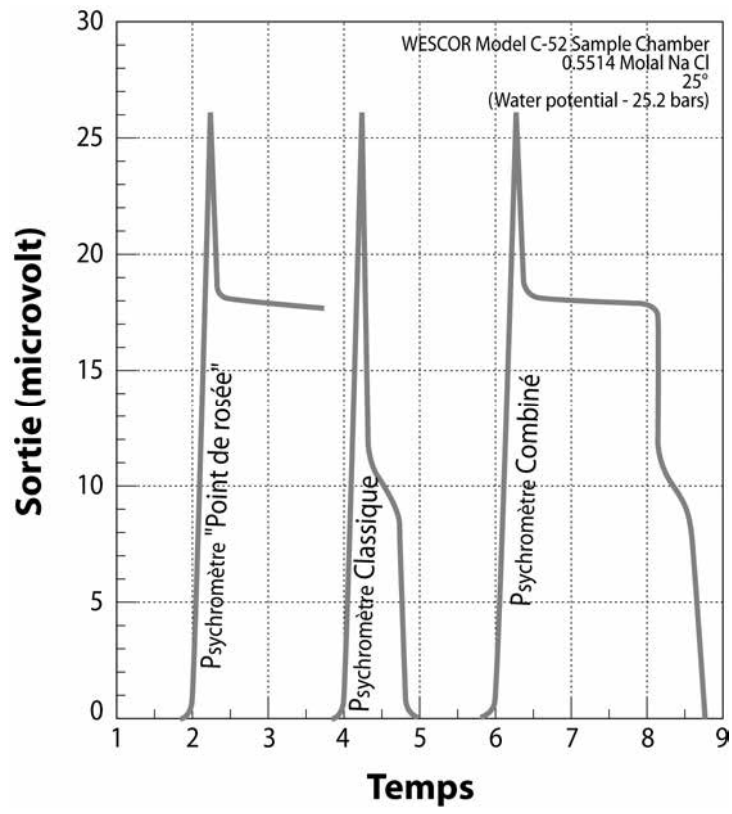
**Figure 4** – Courbes d'étalonnage du micropsychromètre de Dixon-Tyree mode « point de rosée ».

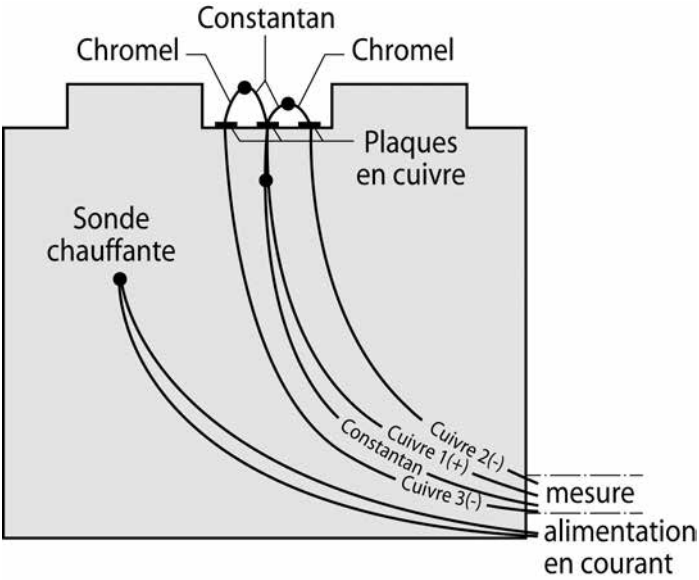
**Figure 5** – Variations de la différence de potentiel hydrique du xylème ( $\Psi_{\text{tronc}} - \Psi_{\text{racines}}$ ) au cours des seize séries des cinq arbres étudiés (N1, N2, N3, S16 et S17).

**Photo 1a, 1b, 1c** - Préparation du micropsychromètre de Dixon-Tyree pour les mesures de potentiel hydrique du xylème au niveau de la jonction de greffage ( $\Psi_{\text{tronc}}$  et  $\Psi_{\text{racines}}$ ).

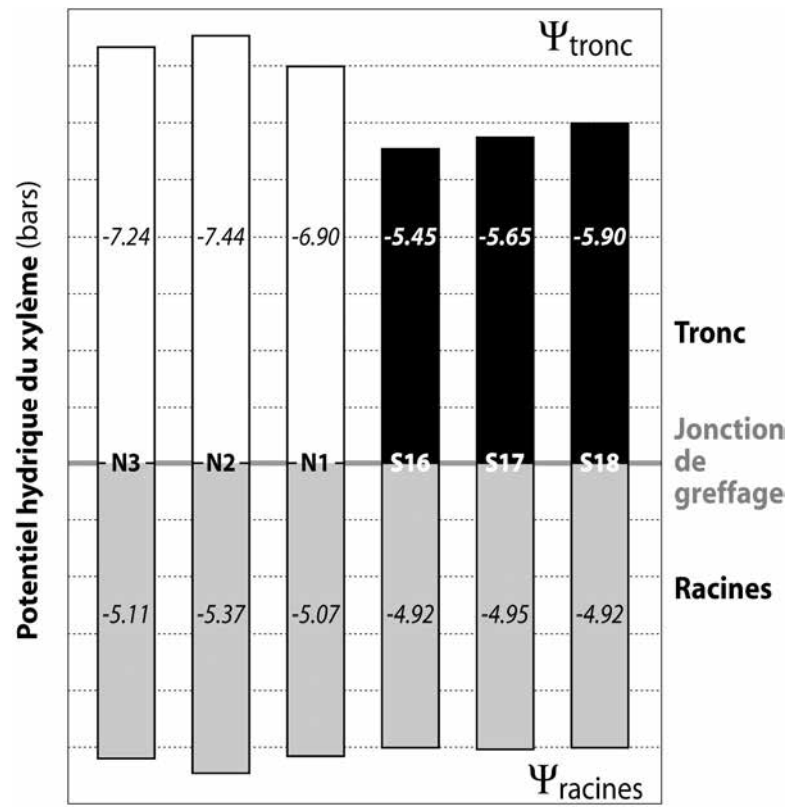
Série	Arbre						Confirmation hypothèse
	<b>N1</b>	<b>N2</b>	<b>N3</b>	<b>S16</b>	<b>S17</b>	<b>S18</b>	
1			A	B			Oui
2	A	A	A	A	A	A	Neutre
3	A	A	A	B		B	Oui
4			A	B		B	Oui
5	A	AB	A	AB	AB	B	Partielle
6	AB	A	A	AB	B	B	Partielle
7	AB	A		AB	B	AB	Partielle
8	B	AB		B	B	A	Neutre
9	A	A	A	A	A	A	Neutre
10	AB	A	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

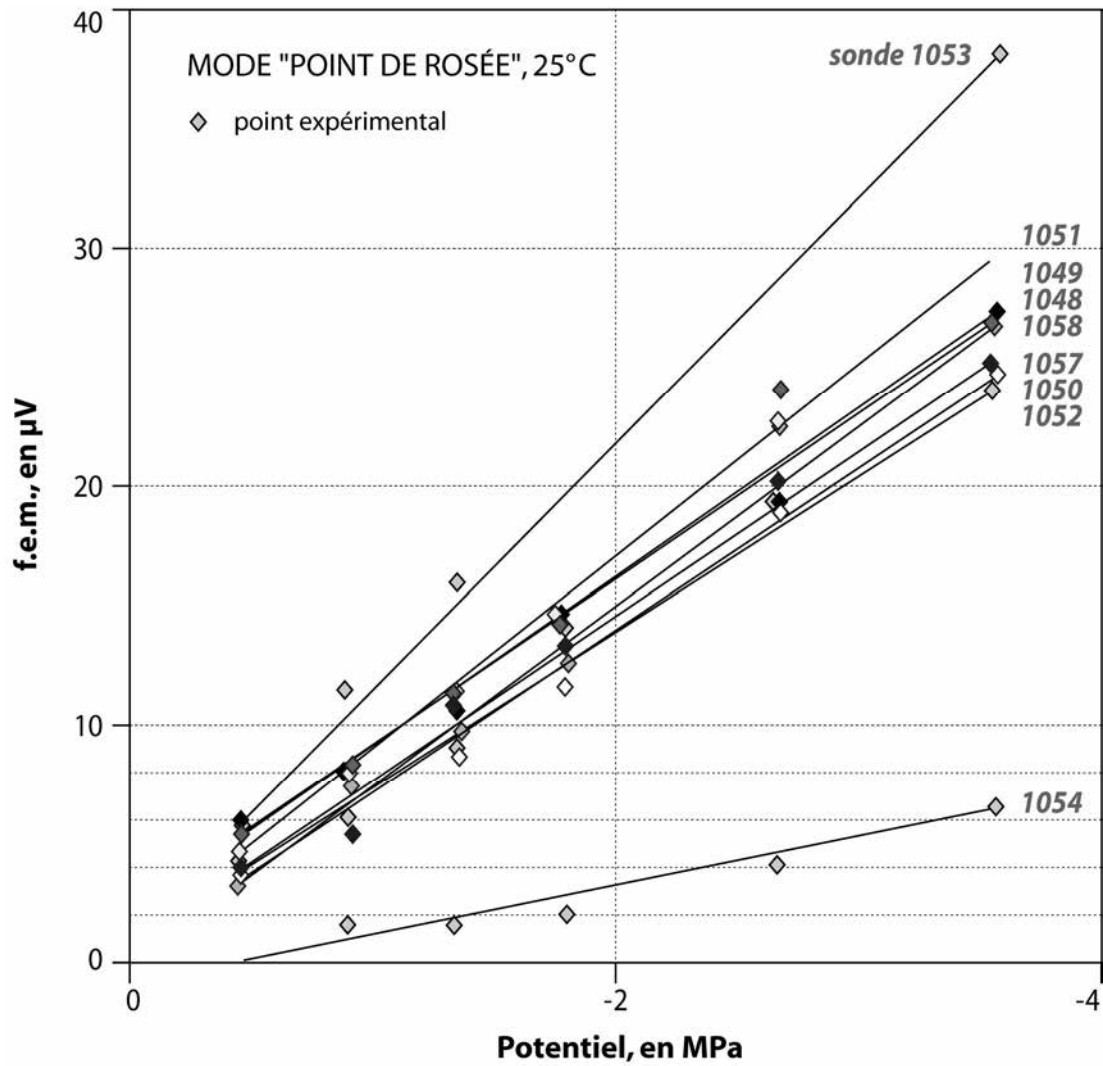
Arbre	Nombre de données	$\Psi$ racines – $\Psi$ tronc	Signification	Niveau de signification
<b>N3</b>	16	1,64	A	0,0002
<b>N2</b>	16	1,56	A	
<b>N1</b>	16	1,41	A	
<b>S17</b>	16	0,65	B	
<b>S16</b>	16	0,49	B	











Courbes d'étalonnage des sondes de Dixon-Tryee	Formule
<b>1048</b>	f.e.m. = $-7,4387 \times \Psi + 1,6946$ ( $R^2 = 0,977$ )
<b>1049</b>	f.e.m. = $-6,9418 \times \Psi + 1,9168$ ( $R^2 = 0,9903$ )
<b>1050</b>	f.e.m. = $-6,9213 \times \Psi - 0,163$ ( $R^2 = 0,9933$ )
<b>1051</b>	f.e.m. = $-7,8965 \times \Psi + 0,9749$ ( $R^2 = 0,996$ )
<b>1052</b>	f.e.m. = $-6,695 \times \Psi + 0,8748$ ( $R^2 = 0,9885$ )
<b>1053</b>	f.e.m. = $-10,276 \times \Psi + 1,6372$ ( $R^2 = 0,9977$ )
<b>1054</b>	f.e.m. = $-1,968 \times \Psi - 0,9435$ ( $R^2 = 0,9411$ )
<b>1057</b>	f.e.m. = $-7,1204 \times \Psi + 0,3307$ ( $R^2 = 0,9903$ )
<b>1058</b>	f.e.m. = $-7,6652 \times \Psi - 0,0105$ ( $R^2 = 0,9853$ )

