

ETUDE DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DES TRONCS D'HEVEA : CAS D'UNE PLANTATION EN COTE D'IVOIRE. (II) RESULTATS ET DISCUSSION

Jerzy J. NIZINSKI¹, Gérard GALAT², Anh GALAT-LUONG²

RÉSUMÉ:

La nécrose de l'écorce de l'hévéa est une affection du tronc, s'exprimant par une altération des tissus corticaux au niveau desquels se situent les tissus conducteurs de latex. Nous avons étudié les transferts hydriques dans des plantations en Côte d'Ivoire (mai et septembre 2004) dans une futaie d'hévéas (clone PB-260) plantée en janvier 1996, sur des individus «sains» et sur des individus «nécrosés». Les mesures de potentiel hydrique nous permettent d'apprécier les résistances le long du continuum racines – tronc – feuilles: les résistances au passage de l'eau entre le tronc et les feuilles sont les mêmes pour les individus «sains» et les individus «nécrosés»; les résistances au passage de l'eau entre les racines et le tronc différencient en revanche radicalement les deux types d'individus au niveau de la jonction de greffage; la résistance est exceptionnellement élevée pour les individus «nécrosés». Les résultats semblent montrer une différence de fonctionnement dans la régulation du flux transpiratoire entre individus «sains» et individus «nécrosés». Les mesures ont été ici faites en conditions de disponibilité en eau optimales, il faudrait poursuivre ces mesures en conditions de stress hydrique pour la plante, on pourrait alors avoir des résultats plus contrastés.

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

ASBTRACT:

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.

Key-words: *Hevea brasiliensis*, clone PB 260, Côte d'Ivoire, bark necrosis, transpiration, hydraulic conductance of a stem.

¹ I.R.D., UMR 211 «BIOEMCO», Centre IRD d'Orléans, Orléans, France, georges.nizinski@ird.fr.

² Institut de Recherche pour le Développement, UR 060 « CLIFA », Montpellier, France.

1. RÉSULTATS ET DISCUSSION

1.1. Paramétrisation du sol et du couvert végétal

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

Tableau 1. Caractéristiques morphologiques du peuplement de la station d'étude P20. (Nizinski et al., 2009)

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

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



Fig. 1 Vue générale de la placette d'étude – P20: futaie d'hévéas (clone PB-260) plantée en janvier 1996 à l'état de plantules issues de boutures, plantules d'environ 0,3 m de hauteur, plantées en rangs orientés nord-sud avec un écartement de 4 m entre deux individus d'une même ligne et un écartement de 6 m entre deux lignes, avec comme paramètres: hauteur moyenne de 15 m; circonférence moyenne de 59,6 cm; densité de 333 arbres ha⁻¹; surface terrière de 10 m² ha⁻¹; volume de bois de 79,3 m³ ha⁻¹; indice foliaire de 3,2; zone racinaire de 4 m.

Tableau 2. Résultats des mesures

a) Résultats de mai 2004						b) Résultats de septembre 2004				
	grandeurs mesurées	2 individus sains	3 individus nécrosés	différence	significatif	grandeurs mesurées	5 individus sains	5 individus nécrosés	différence	significatif
	T_f (°C)	27,9	28,0	0,1	NS	T_f (°C)	26,6	26,5	0,1	NS
	T_{air} (°C)	27,1	27,1	0,0	NS	T_{air} (°C)	26,0	26,0	0,0	NS
	r_s (s cm ⁻¹)	1,2	1,8	0,6	S	r_s (s cm ⁻¹)	1,6 ± 0,49	2,8 ± 0,53	1,6	S
	Ψ_f base (bars)	-3,2	-3,6	0,4	NS	Ψ_f base (bars)	-3,8	-3,4	0,4	NS
	Ψ_f moy jour	-6,0 ± 0,91	-8,6 ± 1,40	2,6	S	Ψ_f moy jour	-6,1 ± 1,04	-7,4 ± 1,35	1,3	S
	Ψ_t base (bars)	-4,1	-4,1	0,0	NS	Ψ_t base (bars)	-4,0	-4,0	0,0	NS
	Ψ_t moy jour	-4,6 ± 0,87	-5,6 ± 1,32	1,0	S	Ψ_t moy jour	-5,6 ± 1,09	-7,2 ± 0,97	1,2	S
	Ψ_r base (bars)	-4,1	-4,1	0,0	NS	Ψ_r base (bars)	-4,4	-4,0	0,4	NS
	Ψ_r moy jour	-3,9	-4,2	1,0	NS	Ψ_r moy jour	-4,9 ± 0,09	-5,2 ± 1,10	0,3	NS
	Ψ_{sol} (bars)	-0,1	-0,1	0,0	NS	Ψ_{sol} (bars)	-0,1	-0,1	0,0	NS

Pour chaque feuille, nous avons une cinétique de la température de la feuille (T_f), de l'air et de la différence de température entre la feuille et l'air. Nous avons obtenu respectivement pour les individus « sains » et les individus « nécrosés » en mai $T_f = 27,9$ et $28,0$ °C ($T_a = 26,0$ °C) et en septembre $T_f = 27,9$ et $28,0$ °C ($T_a = 27,1$ °C), soit en mai une température des individus « sains » inférieure de 0,1 °C à celle des individus « nécrosés » et

en septembre une température des individus « sains » supérieure de 0,1 °C à celle des individus « nécrosés » (**Tableaux 2 a, b**) du couvert d'hévéas. Les mesures ont été faites en saison de pluies, avec une couverture nuageuse maximale et une température minimale. Cette différence de température est inférieure à la précision de l'appareil (différence minimale de 0,3 °C). On ne peut donc pas conclure à une différence de température de surface entre les deux types d'individus.

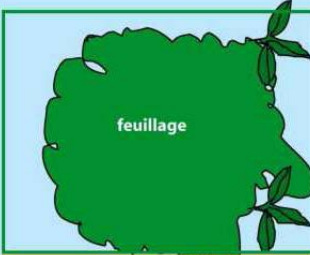
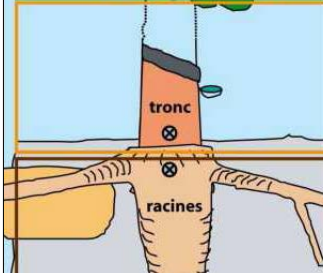
1.2. Flux de vapeur d'eau, potentiels et résistances dans le système sol – plante – atmosphère

Évapotranspiration potentielle du couvert et transpiration des individus « sains » et des individus « nécrosés »: les caractéristiques morphologiques du peuplement étant les mêmes pour les deux types d'individus, l'évapotranspiration potentielle est la même pour tout le peuplement, elle représente l'énergie maximale pouvant être dissipée sous forme de chaleur de vaporisation de l'eau. L'évapotranspiration potentielle, moyenne journalière du couvert d'hévéas sur 18 jours, du 5 au 13 mai et du 7 au 25 septembre 2004, issue de l'équation de *Penman (1948)* est de 3,6 mm jour⁻¹, valeur comparable à celle mentionnée par *Monteny (1987)* pour la même région (3,5 mm jour⁻¹). L'évapotranspiration potentielle suit les variations de rayonnement au-dessus du couvert. Pour une parcelle bien irriguée et dense, le flux de chaleur sensible sera quasiment nul, l'énergie reçue à la surface du sol est utilisée dans le flux de chaleur latente de vaporisation de l'eau. Le maximum d'évapotranspiration potentielle se situe entre 12h et 15h avec des valeurs comprises entre 13,5 et 15,6 dm³ arbre⁻¹ heure⁻¹, quand le rayonnement est le plus important, la température de l'air la plus forte (jusqu'à 37°C), le déficit de saturation de l'air maximal et l'humidité relative minimale (63%).

Les valeurs maximales de transpiration sont obtenues vers 14h. La transpiration moyenne maximale pour les individus « sains » est respectivement de $T_r = 12,5; 12,0$ et $11,5$ dm³ H₂O arbre⁻¹ heure⁻¹, soit une moyenne de $T_r = 12,1$ dm³ H₂O arbre⁻¹ heure⁻¹. L'écart relatif entre individus est de 16 % avec une erreur standard de 0,6 pour un pas de temps d'une heure. La transpiration moyenne maximale pour les individus « nécrosés », est respectivement de $T_r = 10,3; 9,0$ et $11,8$ dm³ H₂O arbre⁻¹ heure⁻¹, soit une moyenne de $T_r = 10,4$ dm³ H₂O arbre⁻¹ heure⁻¹. L'écart relatif entre individus est de 10,7 % avec une erreur standard de 0,6 pour un pas de temps d'une heure. La différence maximale à 14h entre individus « sains » et individus « nécrosés » est de $T_r = 1,7$ dm³ H₂O arbre⁻¹ heure⁻¹. La transpiration des individus « nécrosés » est plus faible que celle des individus « sains » à tous les pas de temps de prise de mesure (20 minutes, 1 heure, 1 jour) permettant de conclure qu'une contrainte hydrique est imposée à ces individus « nécrosés ». Nous avons représenté dans le **Tableau 3**, les moyennes sur dix-huit jours des transpirations instantanées: 1,9 (±0,11; individus « sains ») et 1,4 (±0,31; individus « nécrosés ») cm³ H₂O arbre⁻¹ s⁻¹, soit une transpiration des individus « nécrosés » inférieure de 30 % à celle des individus « sains » ($T_r = 0,5$ cm³ H₂O arbre⁻¹ s⁻¹) (**Tableau 3**). La transpiration moyenne journalière a été respectivement pour les individus « sains » et les individus « nécrosés » de 2,7 mm jour et 2,3 mm jour ($T_r = 17,5$ et $13,5$ dm³ arbre⁻¹ jour⁻¹).

Potentiels et résistances au flux de sève des individus « sains » et des individus « nécrosés »: on a choisi, les 12 mai et 19 septembre, des individus « sains » et des individus « nécrosés », proches les uns des autres, pour le suivi des cinétiques journalières de la résistance stomatique, du potentiel foliaire, du potentiel du xylème - tronc, du potentiel du xylème - racines et des potentiels de base correspondants, les résultats figurent dans les **Tableaux 2a** et **2b**.

Tableau 3. Les moyennes sur dix-huit jours des transpirations instantanées

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

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

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

Les moyennes journalières du potentiel du xylème (Tableaux 2a et 2b) sont respectivement, pour les individus « sains » et les individus « nécrosés »; 1^e) pour les racines $\Psi_{\text{racines}} = -3,9$ bars et $-4,2$ bars en mai et $\Psi_{\text{racines}} = -4,9 (\pm 0,1)$ et $-5,2 (\pm 1,1)$ bars en septembre; 2^e) pour les troncs $\Psi_{\text{tronc}} = -4,6 (\pm 0,9)$ et $-5,6 (\pm 1,3)$ bars en mai et $\Psi_{\text{tronc}} = -5,6 (\pm 1,1)$ et $-7,2 (\pm 1,0)$ bars en septembre. Le potentiel du xylème des individus « nécrosés » est inférieur à celui des individus « sains » d'environ 0,5 bars pour les racines et d'environ 1,5 bar pour les troncs.

Les mesures ont été faites en saison humide, dans des conditions de disponibilité en eau optimales, ainsi, les résistances stomatiques mesurées sont les résistances stomatiques minimales et sont, respectivement pour les individus « sains » et les individus « nécrosés » $r_{\text{stomatique}} = 1,2$ et $1,8 \text{ s cm}^{-1}$ en mai et $1,59 (\pm 0,5)$ et $2,8 (\pm 0,5) \text{ s cm}^{-1}$ en septembre (**Fig. 2**). Les résistances stomatiques minimales des individus « nécrosés » sont supérieures à celles des individus « sains » d'environ $1,0 \text{ s cm}^{-1}$, et sont associées à des potentiels foliaires plus négatifs que chez individus « sains », et à une transpiration inférieure à celle des individus « sains » suggérant l'induction d'un stress hydrique pour les individus « nécrosés » (**Fig. 3**).

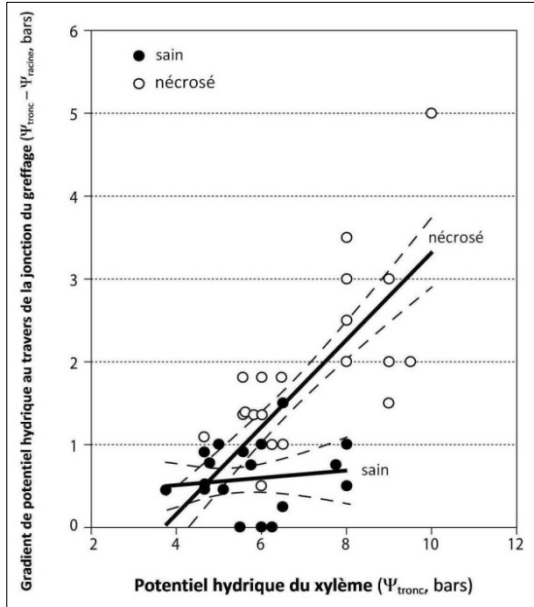


Fig. 2 Relation entre le gradient de potentiel hydrique au travers la jonction et le potentiel hydrique du tronc ($\Psi_{\text{racines}} - \Psi_{\text{tronc}}$) et potentiel hydrique moyen du xylème (Ψ_{tronc}) des individus « sains » et « nécrosés ».

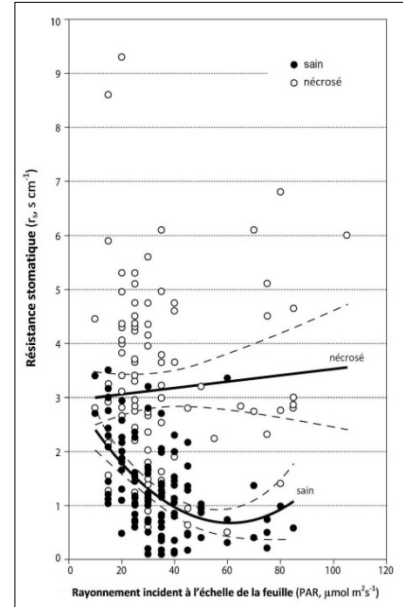


Fig. 3 Relation entre la résistance stomatique ($r_s, \text{ s cm}^{-1}$) et le rayonnement incident (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) à l'échelle de la feuille.

Résistances au flux de sève: nous commencerons par rappeler les résultats des mesures faites au Ghana (*Nizinski et al., 2005*) avec de la Phoxine B®: les premières taches apparaissent au bout de 20 secondes environ sur les individus « sains » et au bout d'une minute environ sur les individus « nécrosés », par ailleurs, la surface « tachée » des individus « sains » (**Fig. 4b**) est supérieure à celle des individus « nécrosés » (**Fig. 4a**). Le transfert de Phoxine B®, donc de sève brute, est qualitativement plus important et plus rapide chez les individus « sains » que chez les « nécrosés ». Nous avons utilisé l'analogie de la loi d'Ohm (*Landsberg et Gower, 1996*) dans l'analyse du flux de sève brute: supposant une continuité de flux entre racines et cavités sous-stomatiques, la transpiration d'une feuille est proportionnelle à la différence de potentiel entre le sol et la feuille, et inversement proportionnelle aux résistances existant sur le parcours sol - racines - tronc - cavités sous-stomatiques ($\Delta E = \Delta \Psi / R$). Les mesures de potentiels hydriques nous permettent d'apprécier les résistances le long du continuum racines - tronc - feuilles (**Tableau 3**): les

résistances (R) ou conductance (k_h) ($=1/\text{Résistance}$) au passage de l'eau entre le tronc et les feuilles sont les mêmes pour les individus « sains » ($k_h = 0,3 \pm 0,1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$) et les individus « nécrosés » ($k_h = 0,2 \pm 0,1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$); les conductances au passage de l'eau entre les racines et le tronc diffèrent en revanche radicalement les deux types d'individus: $k_h = 0,2 \pm 0,1 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$ pour les individus « sains » et $k_h = 1,1 \pm 0,3 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O s}^{-1} \text{ bars}^{-1}$ pour les individus « nécrosés », phénomène que l'on retrouve à partir de l'analyse de la conductance des racines aux feuilles (**Tableau 3**). C'est donc au niveau de la jonction de greffage que la conductance est exceptionnellement basse pour les individus « nécrosés », sachant par ailleurs que chez les ligneux, les conductances du xylème ne sont pas les plus limitantes pour la circulation de l'eau (résistances plus faibles qu'au niveau des feuilles). Ainsi cette résistance élevée au flux de sève au niveau de la jonction de greffage chez les individus « nécrosés » induit un stress hydrique chez ces individus: potentiel hydrique du xylème - tronc et potentiel hydrique foliaire plus négatifs que chez les individus « sains », transpiration plus faible que chez les individus « sains » (**Fig. 3**).

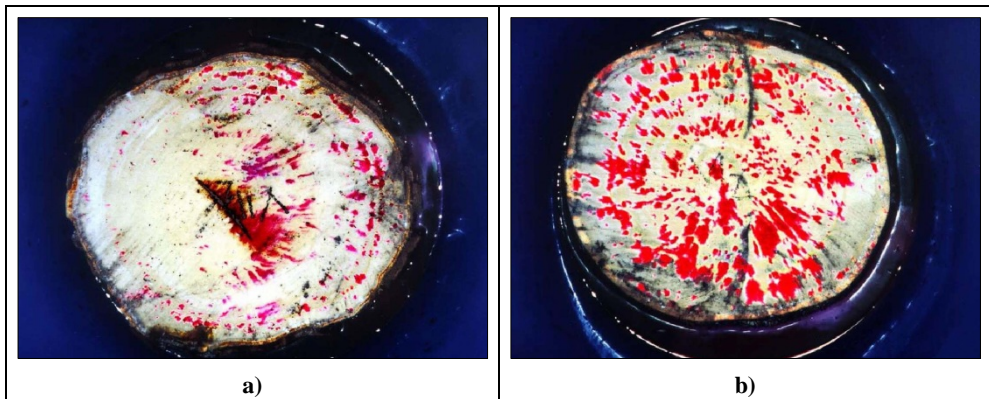


Fig. 4 Surface supérieure d'un billet prélevé au niveau de la jonction de greffage sur le tronc mis dans un bain de Phoxine B®: (a) d'un individu « nécrosé » et (b) d'un individu « sain ».

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

2. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

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

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

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

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

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

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

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

REMERCIEMENTS:

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

BIBLIOGRAPHIE

- Cruiziat P., Tyree M., (1990), *La montée de la sève dans les arbres*. La Recherche, 21, 406-414.
- Dixon M., (2004), *Temperature corrected stem hygrometer. Instruction Manual*, Plant Water Status Instruments, Inc., Guelph, 14 p.
- Kramer P.J., Kozlowski T.T., (1979), *Physiology of woody plants*, Academic Press, London, 811 pages.
- Landsberg J.J., Gower S.T., (1997), *Applications of physiological ecology to forest management*. Academic Press, London, 354 p.
- Monteith J.L., (1965), *Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms*. Symposia of the Soc. Exp. Biol., New York, Academic Press, 19, 205-234.

- Monteith J.L., Unsworth M.H., (1990), *Principles of environmental physics. 2nd édition*, Edward Arnold, London, 291 p.
- Monteny B.A., (1987), *Contribution à l'étude des interactions végétation - atmosphère en milieu tropical humide*. Importance du rôle du système forestier dans le recyclage des eaux de pluies. Thèse d'Etat, Université de Paris - Sud, Orsay, 170 p.
- Nandris D., Chrestin H., Pellegrin F., Moreau R., (2004), *Rapport de synthèse de 1999 à 2004 sur la Nécrose de l'écorce de l'hévéa*. Convention de recherche « NEH » entre l'IRD & IFC-Michelin-SIPH-SOCFINCO, Montpellier, 150 p.
- Nizinski J.J., Dingkuhn M., Clement-Demange A., Fabre D., Clementvidal A., Sainte-Beuve J., (2005), *Analyse écophysiological de l'eau chez Hevea brasiliensis d'individus sains et d'individus atteints de nécrose corticale dans des plantations en Côte d'Ivoire*, Rapport d'expertise n°CP-SIC1812, CIRAD, Montpellier, 30 p.
- Nizinski J.J., Galat-Luong A., Galat G., (2009), *Aspects bioclimatiques de nécrose corticale de l'hévéa*. Geographia Technica, numéro spécial, 355-360.
- Nizinski J.J., Galat-Luong A., Galat G., Lhomme J.P., (2010), *L'intérêt de l'utilisation in situ des sondes psychrométriques de Dixon-Tyree: cas d'une plantation d'hévéa en Côte d'Ivoire*. Climatologie, 7, 109-121.
- Penman H.L., (1948), *Natural evaporation from open water balance bare soil, and grass*. Proceedings of the Royal Society, London, Series A 193, 120-145.
- Philip J.R., (1966), *Plant water relations: some physical aspects*. Annual Review of Plant Physiology, 28, 71-88.
- Ritchie G.A., Hinckley T.M., (1975), *The pressure chamber as an instrument for ecological research*. Advances in Ecological Research, 9, 165-254.
- Thom A.S., (1972), *Momentum, mass and heat exchange of vegetation*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 98, 124-134.