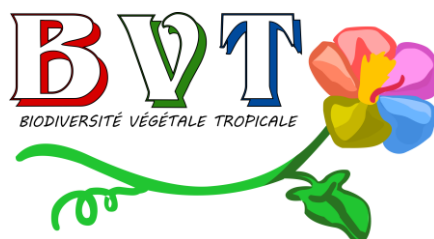




Parcours



**EXTRAPOLATION A L'ECHELLE DE L'ARBRE DE LA
TRANSPIRATION MESUREE SUR UNE PETITE PARTIE
DE LA SECTION D'AUBIER : COMPARAISON DE TROIS
METHODES SUR DEUX ESPECES DU NORD-BENIN**

Rapport de stage de Master 2

Présenté et soutenu le 18 juin 2012 par :

Kohomlan Gbenakpon Beranger AWESSOU

Directeurs de stage

Josiane SEGHIERI & Christophe PEUGEOT
Chargés de recherche IRD, MSE Montpellier

Stage effectué du 1^{er} février au 30 juin 2012

à l'Institut de Recherche pour le Développement-UMR Hydrosciences Montpellier, Université Montpellier II, case Courrier, MSE, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, France.

Remerciements

La présente étude a été financée par le laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM UR050) de l'IRD et le dispositif et le suivi des mesures conjointement par l'Observatoire de Recherche pour l'Environnement Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine-Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique (ORE AMMA-CATCH) et par le programme de recherche international sur l'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA).

Je remercie les co-auteurs de ce rapport que nous avons rédigé sous la forme d'un article. Il s'agit de :

- mon maître de stage Josiane SEGHIERI du Programme international de recherche Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA), chargés de recherche au Laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM) de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) que je remercie particulièrement pour sa grande disponibilité, ses conseils ainsi que sa grande patience tout au long du stage, malgré ses multiples préoccupations,
- mon co-maître de stage, Christophe PEUGEOT du même Laboratoire, responsable du site AMMA-Bénin pour sa disponibilité et ses conseils ainsi que ses soutiens tout au long du stage.
- Frédéric Do, chargé de recherche à l'IRD-UMR Ecologie fonctionnelle et biogéochimie des sols, SupAgro et Alain ROCHETEAU, Ingénieur d'étude à IRD-Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (CEFE ; Montpellier) pour leur aide technique apportée à l'analyse des données de flux de sève.

Je remercie aussi et sincèrement les responsables du master Biodiversité Végétale Tropicale (BVT) en particulier Claude EDELIN et François MUNOZ pour leur sens de responsabilité et leur soutien de tous ordres.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont aidé lors de ce stage :

- Luc SEGUIS du Programme AMMA-Bénin, chargé de recherche à l'IRD, HSM pour la mise à disposition des données de stock d'eau du sol et pour ses conseils.
- Tous les stagiaires et doctorants du Laboratoire HSM.

Je remercie finalement ma famille en particulier mon épouse LANTONKPODE Juldicia, mes filles Shanna et Haraël pour leurs sacrifices et mes amis KOUCHADE Melkior et AYEIGNON David pour leurs immenses soutiens.

LISTE DES ABREVIATIONS

AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

BVT : Biodiversité Végétale Tropicale

CEFE : Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive

DBH : Diamètre extérieur d'un arbre à 1,3m du sol (Diameter at Breast Height)

DHH : Diamètre à Hauteur de l'Homme

DFS : Densité de Flux de Sève

HSM: HydroSciences Montpellier

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

MSE : Maison des Sciences de l'Eau

ORE AMMA-CATCH : Observatoire de Recherche pour l'Environnement Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine-Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique.

SOMMAIRE

<i>LISTE DES ABREVIATIONS</i>	<i>ii</i>
<i>SOMMAIRE</i>	<i>iii</i>
<i>LISTE DES FIGURES</i>	<i>iv</i>
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	<i>v</i>
1. Introduction	1
2. Matériels et méthodes	4
2.1. <i>Le site d'étude, les types de couvert et les espèces étudiés</i>	4
2.2. <i>La technique de mesure de la DFS</i>	5
2.3. <i>Le dispositif de mesures</i>	6
2.4. <i>La transpiration mesurée</i>	6
2.5. <i>Détermination de la forme du profil radial</i>	7
2.6. <i>Les trois méthodes d'extrapolation à la surface totale de l'aubier du flux de sève mesuré sur une portion de sa section</i>	7
2.7. <i>Traitements des données et analyses statistiques</i>	9
3. Résultats	10
3.1. <i>Variations saisonnière et journalière de la densité du flux de sève</i>	10
3.2. <i>Variation saisonnière de la transpiration mesurée</i>	10
3.3. <i>Forme du profil radial du flux de sève</i>	10
3.4. <i>Estimation de la transpiration de l'arbre à partir d'un seul capteur implanté sur la section externe de l'aubier</i>	11
4. Discussion	13
4.1. <i>Transpiration journalière de <i>Vitellaria paradoxa</i> et d'<i>Isobertia doka</i></i>	13
4.2. <i>Variation radiale de la densité de flux de sève</i>	14
4.3. <i>Extrapolation à l'échelle de l'arbre de la transpiration mesurée sur une portion externe de section d'aubier</i>	15
5. Conclusion	17
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	18

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation du site d'étude

Figure 2 : Dispositif de mesure de la transpiration

Figure 3 : Variation journalière de la DFS à différentes profondeurs dans l'aubier sur un arbre de *Vitellaria paradoxa* K3 et sur un arbre d'*Isoberlinia doka* I7

Figure 4 : Rapport de la DFS mesurée à une profondeur i sur la DFS à la profondeur 5-30 mm en fonction de la profondeur d'insertion des capteurs sur les arbres de *V. paradoxa* et sur *I. doka*

Figure 5 : Relation entre les valeurs demi-horaires de la DFS (J) à différentes profondeurs i en fonction des profondeurs de références respectives 5-30mm, 0-50mm et 10-20mm

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : *Dénomination des capteurs du dispositif de Bira et Béléfoungou, Diamètre à Hauteur d'Homme (DHH ou DBH) des arbres et plage de données exploitables.*

Tableau 2 : *Transpiration moyenne journalière ($l.j^{-1}$) estimée en explorant toute la surface de l'aubier avec quatre capteurs par arbre sur les deux espèces sur la période d'étude*

Tableau 3 : *Comparaison des différences relatives entre la transpiration mesurée et les transpirations estimées de *V. paradoxa* et *I. doka* à partir de trois méthodes d'extrapolation à partir de trois profondeurs différentes. En gras italique, les erreurs d'estimations les plus faibles pour chaque méthode et par arbre.*

1. Introduction

Le programme de recherche international Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA), conscient de la nécessité de prendre en compte la végétation dans la modélisation hydrologique, a mis en place un dispositif de mesure de la transpiration ligneuse sur son site principal soudano-guinéen situé au Bénin. Ce dispositif est basé sur la méthode de dissipation thermique (Granier, 1985). La méthode initiale d'intégration à l'échelle de l'arbre d'une mesure ponctuelle suppose l'uniformité de la densité de flux de sève (DFS) sur toute la section de l'aubier. Cependant, elle conduit à d'importants biais allant de -90% à +300% (Nadezhdina et al. 2002). C'est pourquoi, il s'avère nécessaire de prendre en compte les variations de la DFS au sein de l'aubier. En particulier, l'existence de variations azimutale et radiale a été démontrée par Jiménez et al. (2000) et James et al. (2002). La variation azimutale de la DFS serait causée par la variation de l'exposition des feuilles au soleil d'après Granier (1987). Le profil radial varie d'une espèce à une autre et d'un arbre à un autre au sein de la même espèce (Gebauer et al. 2008 ; Poyatos et al. 2007 ; Ford et al. 2004a), mais aussi en fonction de la position sociale de l'arbre (Jiménez et al. 2000). Il peut également varier au cours des saisons et au cours de la journée, en relation principalement avec les variations du déficit de saturation de l'air (Becker, 1996 ; Nadezhdina et al. 2002 ; Ford et al. 2004b ; Saveyn et al. 2008), de l'humidité du sol (Ford et al. 2004b) et de la radiation photosynthétiquement active (Fiora et Cescatti 2006). Le profil radial le plus couramment décrit dans la littérature est celui où la densité de flux est maximale près de la périphérie de l'aubier suivie d'une décroissance exponentielle progressive ou brutale, vers son centre. Ce modèle a été observé surtout chez des espèces tempérées comme *Abies alba* et *Picea excelsa* (Fiora et Cescatti. 2006), *Quercus pubescens* (Poyatos et al. 2007), *Fagus sylvatica* (Luttschwager et Remus 2007), *Pinus pinaster* (Delzon et al. 2004), *Pinus taeda* (Ford et al. 2004a), *Pinus sylvestris* (Nadezhdina et al. 2002), mais également chez quelques espèces tropicales comme *Mangifera indica* (Lu et al. 2000 ; Isarangkool Na Ayutthaya et al. 2010), *Hevea brasiliensis* et *Citrus maxima* (Isarangkool Na Ayutthaya et al. 2010). Cohen et al. (2008) ont montré que chez les espèces tropicales *Citrus sinensis*, *Persea americana* et les espèces tempérées *Cupressus sempervirens*, *Quercus calliprinos*, *Quercus ithaburensis* et *Malus domestica*, le profil suit une forme polynomiale, de même chez *Eucalyptus urophylla* en climat tropical en Chine (Zhou et al. 2002).

La prise en compte de la variation du profil radial de la DFS ne va donc pas de soi. La méthode d'extrapolation à l'échelle de l'arbre la plus fiable, mais aussi la plus coûteuse, consiste à faire la somme des flux mesurés à des profondeurs successives quasi-continues le

long de la section d'aubier, de sa périphérie jusqu'à son centre (Hatton et al. 1990). Cette méthode est conseillée en particulier pour les gros arbres pour lesquels il est impossible d'intégrer le flux total à partir d'une seule sonde. Pour ce faire, on utilise soit des capteurs permanents (Hatton et Vertessy. 1989 ; Lu et al. 2000), soit des sondes mobiles le long du profil (Zang et al. 1996 ; Delzon et al. 2004) ou une sonde à multiples points de mesure (Nadezhdina et al. 2002). La technique est stressante pour l'arbre, compte tenu du nombre de capteurs à installer dans le tronc, et fortement consommatrice de temps si on dispose d'un seul capteur mobile. Cependant, le dispositif peut servir de témoin, de contrôle, pour d'autres méthodes d'intégration à l'échelle de l'ensemble de l'aubier de mesures ponctuelles, c'est-à-dire à partir d'un seul capteur, le plus souvent positionné en périphérie. Ainsi, à partir de l'équation du profil radial de la DFS, Lu et al. (2000) ont proposé de calculer un facteur multiplicatif M . Mais, plus largement répandu est le calcul du facteur de correction c . Il a été utilisé par Zang et al. (1996) sur *Eucalyptus globulus spp. globulus*, une espèce tropicale australienne, par Wullschleger et King (2000) sur *Liriodendron tulipifera*, par Delzon et al. (2004) sur *Pinus pinaster*, par Fiora et Cescatti (2006) sur *Abies alba* et *Picea excelsa*, par Poyatos et al. (2007) sur *Quercus pubescens* et par Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010) sur *Hevea brasiliensis*. Le facteur c tient compte à la fois du profil radial de la DFS et de la portion de la surface de la section d'aubier échantillonnée par la sonde de référence (Delzon et al. 2004). Si Fiora et Cescatti (2006) ont montré que c augmente quand le diamètre des arbres augmente, Delzon et al. (2004) ont montré que c diminuait. Finalement, d'après Wullschleger et King (2000) et Poyatos et al. (2007), cette relation ne serait pas significative. Très peu d'études dans la littérature ont comparé la transpiration mesurée et celle obtenue à partir d'un facteur de correction c ou un facteur multiplicateur.

La présente étude se propose de comparer trois méthodes d'extrapolation : la méthode utilisée par Granier (1985) qui suppose l'uniformité radiale de la DFS, et les deux méthodes qui prennent en compte la forme de sa variation dans la section d'aubier. Le jeu de données utilisé est celui collecté sur le site soudanien au nord du Bénin dans le cadre du programme AMMA sur *Vitellaria paradoxa* (le karité) dans une jeune jachère et sur *Isobertinia doka* dans une forêt sèche protégée. Cette étude est pionnière car, à notre connaissance, seuls Bayala et al. (2008) ont cherché à quantifier la transpiration du karité dans un parc agroforestier du Burkina Faso. En revanche, nous n'avons trouvé aucune référence sur la transpiration d'*Isobertinia doka*. Ce travail fait suite aux travaux réalisés sur les mêmes espèces et le même site dans le cadre des stages de masters de Servière (2010) et d'Awessou (2011). Ces deux masters s'appuyaient sur un dispositif simplifié de mesure continue par dissipation thermique

(Granier 1985) mis en place en novembre 2008. Les travaux se sont focalisés alors sur l'identification des déterminants biologiques et physiques de la DFS. Cependant, faute d'autorisation de couper des arbres dans la forêt protégée pour pouvoir établir la relation entre la surface de la section d'aubier et le diamètre des arbres, seule la transpiration des arbres de karité avait été estimée par la méthode d'extrapolation supposant l'uniformité du profil radial. A la fois pour pallier cette méconnaissance de la surface de la section d'aubier des arbres d'*I. Doka* et pouvoir prendre en compte la forme du profil radial de la DFS chez les deux espèces, le dispositif initial a été complété en novembre 2010 avec la mise en place de sondes tout le long du profil radial sur les mêmes arbres. De plus, la mesure est maintenant basée sur une méthode transitoire de dissipation thermique (TTD, Do et Rocheteau. 2002b, Isarangkool Na Ayutthaya et al. 2010), afin de limiter l'erreur due au gradient thermique naturel. La densité des arbres étant relativement faible dans la jachère à *V. paradoxa*, nous supposons que la variation azimutale de la DFS est négligeable. Cette hypothèse ne devrait pas être vérifiée dans la forêt. Par contre, nous supposons que la variation azimutale y est compensée par l'absence, à l'opposé d'une futaie, d'une structure forte dans la répartition des arbres.

En s'appuyant sur le nouveau dispositif, les objectifs de la présente étude sont donc, chez les deux espèces, (1) de quantifier la transpiration journalière à l'échelle de l'arbre (2), de caractériser le profil radial de la DFS (3), de comparer les estimations et les écarts des résultats par rapport à la transpiration mesurée sur toute la section d'aubier entre les trois méthodes d'extrapolation suivantes : celle qui suppose l'uniformité du profil radial, celle qui utilise le calcul d'un facteur de correction c et celle qui utilise le calcul d'un facteur de multiplication M .

Les résultats attendus doivent permettre de choisir la meilleure approche pour évaluer la transpiration ligneuse à un moindre coût et, à terme, une meilleure estimation de sa contribution à l'évapotranspiration.

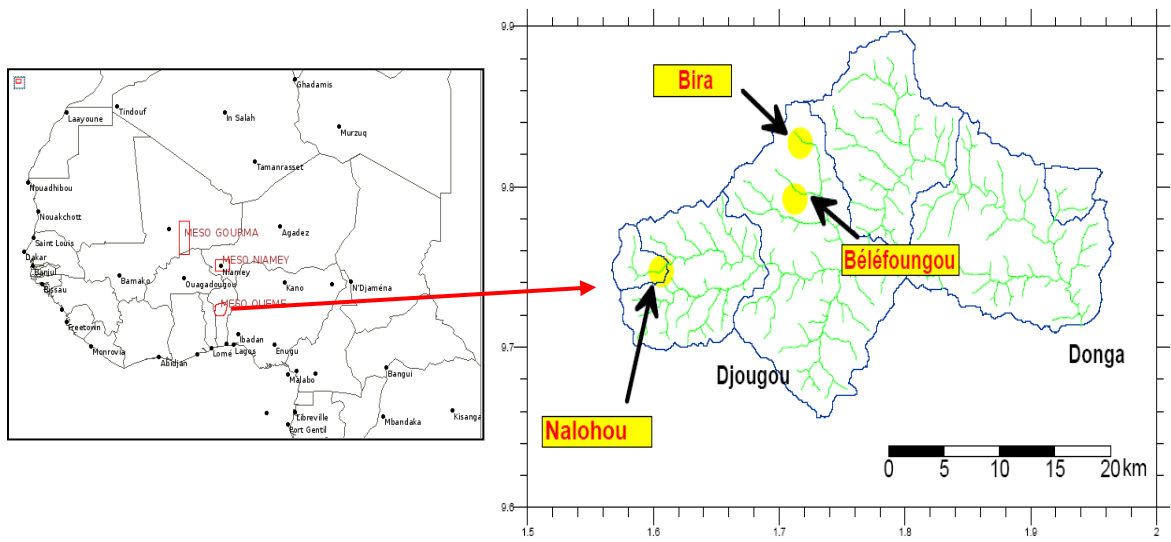


Figure 1 : Localisation du site d'étude

2. Matériels et méthodes

2.1. Le site d'étude, les types de couvert et les espèces étudiés

Le site d'étude se situe sur le bassin versant de la Donga à 540 km au Nord-Ouest de Cotonou entre les parallèles 9°40' - 9°54'N et 1°34' - 1°58' E. La saison des pluies s'étend d'avril à octobre et la pluviométrie annuelle moyenne est de 1200 mm (1950-2005, Lawin, 2007). 80% de la surface du site sont constitués de sols ferrugineux (Blanchard et al. 2007). Le paysage originel a été modifié par d'anciennes pratiques culturelles qui se sont intensifiées au cours de la dernière décennie. Les terres cultivées sont des mosaïques de cultures (manioc, arachide, igname, maïs, millet, sorgho, coton) sous parcs à nérés (*Parkia biglobosa*) et à karités (*Vitellaria paradoxa*). Par conséquent, les jachères sont dominées par le néré et le karité (Harris, 2004 ; Blanchard et al. 2007).

Les deux types de couverts étudiés sont représentatifs de la majorité des couverts non cultivés du bassin versant de la Donga (Figure 1). Il s'agit de :

- la forêt classée de Béléfoungou : C'est une forêt claire, résultant de la dégradation d'une forêt à Légumineuses (Aubreville, 1950). L'espèce ligneuse dominante, *Isobertinia doka*, contribue à 43 % de la densité du couvert de la strate supérieure à 12 m et de la strate inférieure à 6 m de hauteur (Blanchard *et al.* 2007).
- la savane arbustive de Bira : C'est une jeune jachère composée de graminées pérennes et d'arbustes. L'espèce ligneuse dominante est *V.paradoxa* qui contribue à plus de 50% de la densité du couvert supérieur et à 6 m de haut (Blanchard *et al.* 2007).

Les espèces ligneuses instrumentées avec des capteurs de flux de sève sont les espèces dominantes de chacune des deux stations:

- ***Isobertinia doka***: De la famille des Césalpiniacées, c'est une espèce à feuilles semi-persistantes (Seghieri et al. 2012). Cette espèce occupe les forêts claires de l'Afrique Occidentale et Centrale (Aubreville, 1950). Les arbres possèdent une cime assez étroite et ouverte allant jusqu'à plus de 12m de haut, avec un tronc de 3-5m, souvent creux, pouvant atteindre 60 cm de diamètre. Les racines pivotantes et obliques permettent une exploitation des eaux souterraines et des remontées de nutriments favorables aux cultures (Dourma et al. 2009).
- ***Vitellaria paradoxa***: De la famille des Sapotacées, c'est également une espèce à feuilles semi-persistantes (Seghieri et al. 2012). Elle occupe les savanes soudaniennes et guinéennes et pousse sur tous les types de sol, sauf les sols inondés. Les arbres possèdent une cime d'allure sphérique, dense, fortement branchue et ramifiée pouvant

aller à plus de 12 m de haut et un fût généralement court (2-3m) et noueux. Le karité est une espèce agroforestière majeure dans toute la bande soudanienne. Au Bénin, la contribution de l'exportation des produits issus du karité au budget national place l'espèce en troisième position après le coton et l'anacarde (Gnanglè, 2005).

2.2. La technique de mesure de la DFS

La DFS est mesurée par la méthode de dissipation thermique de Granier (1985, 1987). Cette méthode est basée sur des capteurs constitués de deux sondes de mesure de la température insérées dans l'aubier de l'arbre, à 1.3 m du sol, et séparées verticalement d'environ 4 cm. Chaque sonde contient un thermocouple cuivre-constantan (Cu-Cn) de 2mm de diamètre. Ces deux thermocouples sont montés en opposition afin de mesurer l'écart de température entre les deux sondes. La sonde la plus en aval du flux de sève est équipée d'une résistance (aluminium) chauffée en continu à une puissance constante de 0.20W. L'autre sonde située en dessous n'est pas chauffée et sert de référence en indiquant la température de l'arbre. Le signal brut est donc constitué par la différence de température entre les deux sondes. Pour limiter le biais dû au gradient thermique naturel pouvant s'avérer non négligeable en régime de chauffage continu et obtenir une plus grande stabilité du flux nul de référence, Do et Rocheteau (2002a, 2002b) ont proposé une technique alternant les cycles de chauffage et de refroidissement (méthode de dissipation thermique transitoire, TTD) qui est utilisée sur notre dispositif. Pour mesurer J toutes les 30mn, un cycle de chauffage de 10mn suivi d'un refroidissement de 20 mn est utilisé. Les signaux de températures sont enregistrés toutes les 10mn. Le signal dit «alterné» (ΔT_a) est l'écart entre les valeurs du signal brut avant et après le temps de refroidissement. Il est défini comme :

$$\Delta T_a = \Delta T_{on} - \Delta T_{off} \quad (1)$$

où ΔT_{on} = la différence de température atteinte à la fin de la période de chauffage et ΔT_{off} , la différence de température après la période de refroidissement.

Par analogie à la méthode par chauffage continu (Granier 1985), Do et Rocheteau, (2002b) ont établi une formule d'étalonnage entre un indice dit « alterné » de flux Ka et les différences de températures entre les deux sondes.

$$Ka = (\Delta T_{0a} - \Delta T_{ua}) / \Delta T_{ua} \quad (2)$$

où ΔT_{0a} = le signal alterné à flux nul et ΔT_{ua} = le signal alterné en présence de flux.

De même, par analogie à la méthode par chauffage continu, Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010) ont établi une formule d'étalonnage entre la densité de flux de sève J et Ka , supposée valable pour toutes les espèces ligneuses.

Tableau 1 : Dénomination des capteurs du dispositif de Bira et Béléfoungou, Diamètre à Hauteur d'Homme (DHH ou DBH) des arbres et plage de données exploitables. K=Karité ; I= Isoberlinia.

N° arbre	DHH (cm)	Profondeur d'insertion (mm)	Plage de données exploitables
K1	32.5	10-20	<i>01/12/2010 au 13/11/2011</i>
		0-50	
		5-30	
		30-55	
		60-85	
		90-115	
K3	38.2	10-20	01/12/2010 au 13/11/2011
		0-50	<i>01/12/2010 au 01/06/2011</i>
		5-30	
		30-55	01/12/2010 au 13/11/2011
		60-85	01/12/2010 au 09/06/2011
		90-115	01/12/2010 au 20/07/2011
I2	37.7	10-20	01/12/2010 au 14/11/2011
		0-50	01/12/2010 au 14/11/2011
		5-30	01/12/2010 au 29/10/2011
		30-55	<i>01/12/2010 au 01/12/2010</i>
		60-85	01/12/2010 au 14/11/2011
		90-115	01/12/2010 au 03/08/2011
I7	38.2	10-20	01/12/2010 au 04/06/2011
		0-50	01/12/2010 au 14/11/2011
		5-30	<i>01/12/2010 au 01/06/2011</i>
		30-55	01/12/2010 au 14/11/2011
		60-85	01/12/2010 au 08/11/2011
		90-115	01/12/2010 au 14/11/2011

$$J = 12.95 Ka, \quad (3)$$

où J = la densité de flux de sève en $l.dm^{-2}.h^{-1}$,

2.3. Le dispositif de mesures

Six arbres par type de couvert ont été choisis comme étant représentatifs des classes de diamètre majoritaires de chaque espèce dans le couvert. Les deux arbres de plus gros diamètre de chaque espèce sont consacrés à notre étude précisément, c'est à dire à l'analyse du profil radial de la DFS. Ils sont équipés de six capteurs chacun (figure 2a). Les arbres de plus petit diamètre, bien qu'équipés de un à deux capteurs, ne sont pas utilisés car trop petits pour pouvoir déterminer un profil radial. Cependant les données issues d'un seul *I. doka* ont été exploitées car sur l'autre arbre, on ne disposait pas de données exploitables sur une période suffisamment longue. Le diamètre des arbres et le codage des capteurs et des arbres sont présentés dans le tableau 1. Chaque arbre est identifié par la lettre K (comme karité) pour *V. paradoxa* et la lettre I (comme Isoberlinia) pour *I. doka* suivie du numéro de l'arbre. Des capteurs de type Dynamax de l'ancien dispositif sont maintenus à des profondeurs de 10-20mm et 0-50mm. Y ont été ajoutés des capteurs de type UP (UP gmBh, Cottbus Germany) insérés à quatre profondeurs: 5-30mm, 30-55mm, 60-85mm et 90-115mm (figure 2 et tableau 1). Les sondes sont ensuite protégées contre le rayonnement direct par un complexe isolant multicouche étanche à la pluie. Les données sont enregistrées grâce à une centrale d'acquisition de type CAMPBELL (Campbell/CR1000) tous les 10mm. Compte tenu du dysfonctionnement de certains capteurs, toutes les données collectées depuis novembre 2010 ne sont pas exploitables même sur les trois arbres retenus (tableau1). Les données que nous avons utilisées pour ce travail portent sur la période allant de décembre 2010 à novembre 2011 sur K1 et de décembre 2010 à mai 2011 sur K3 et I7.

2.4. La transpiration mesurée

Elle est calculée à partir de la somme des transpirations mesurées par les quatre capteurs UP installés à la suite les uns des autres sur toute la section d'aubier (figure 2b), en considérant comme homogène la portion de section d'aubier intégrée par chaque capteur. La transpiration à chaque profondeur de mesure est obtenue par le produit de la DFS par la surface de la section que le capteur intègre. La transpiration (F ; $l.h^{-1}$) à l'échelle de l'arbre se calcule alors par l'équation :

$$F = \sum_{i=1}^n \pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) * J_i \quad (3)$$

où J_i est la DFS ($l.dm^{-2}.h^{-1}$) à la profondeur i ; r_i et r_{i-1} sont respectivement le rayon intérieur et le rayon extérieur en dm^{-2} de l'anneau contenant le capteur.

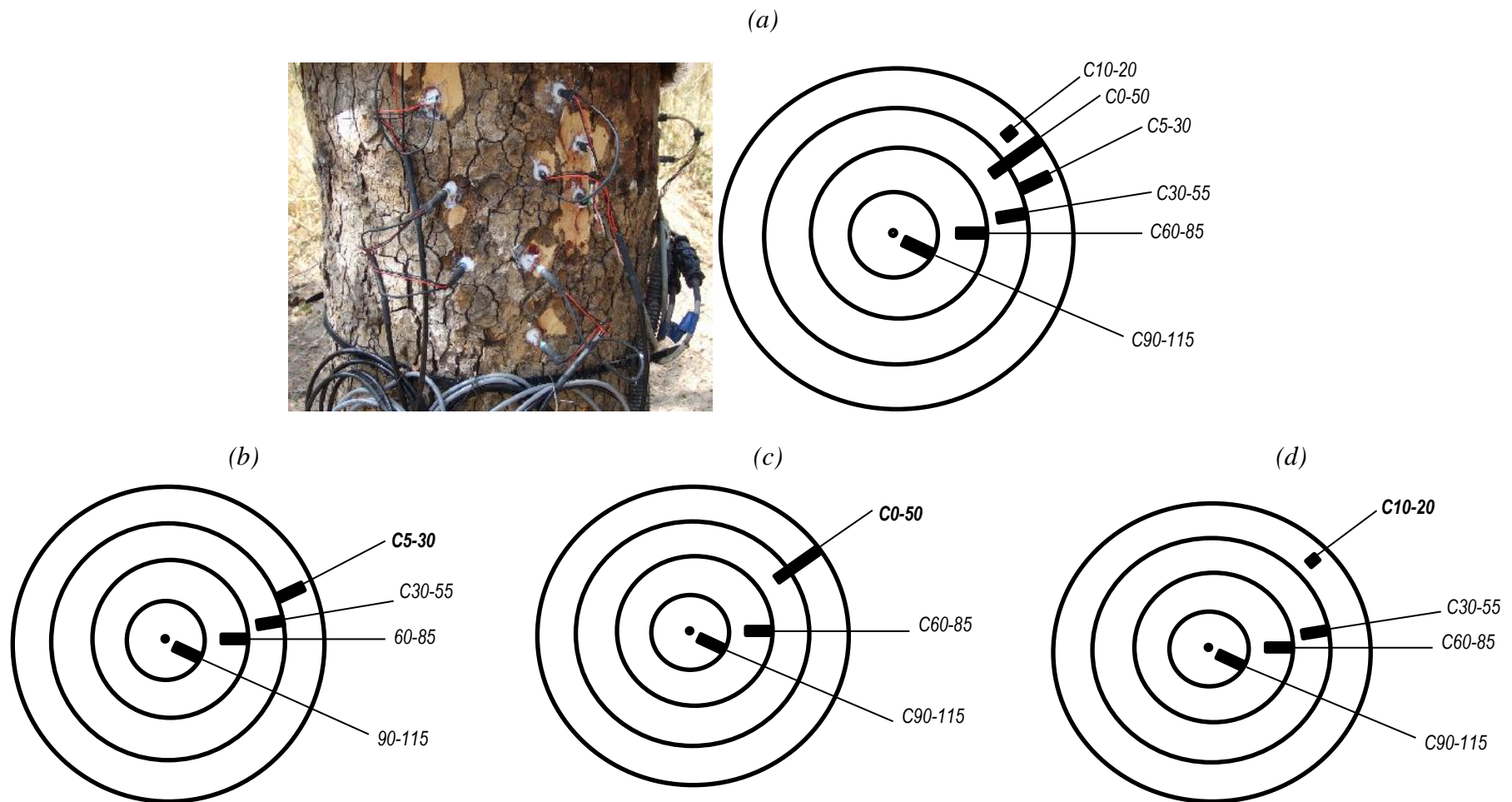


Figure 2 : Dispositif de mesure de la transpiration : 6 paires de sondes implantées sur *I. Doka* (photo A. Rocheteau -IRD/CEFE, novembre 2010) et schéma d'implantation des capteurs dans les arbres (a), schéma d'implantation des capteurs utilisés pour la détermination du profil radial, la transpiration mesurée et l'estimation de la transpiration à partir du capteur C5-30 (b), et schéma d'implantation des capteurs utilisés pour l'estimation de la transpiration à partir du capteur C0-50 (c), et C10-20 (d). C= capteur, 0-50 = profondeur 0-50mm. En gras les capteurs qui servent de référence à tour de rôle.

Ce modèle suppose que l'aubier soit de forme circulaire et que les quatre capteurs explorent la surface totale de l'aubier, sans chevauchement ni lacune entre les portions d'aubier qu'ils intègrent successivement.

La transpiration nocturne est la moitié de la somme des flux demi-horaires calculés entre 00h00-6h30 et 19h-23h30 (heure locale). La transpiration diurne est la moitié de la somme des flux demi-horaires calculés entre 7h et 18h30 (heure locale). La transpiration journalière est la somme de la transpiration diurne et de la transpiration nocturne.

2.5. Détermination de la forme du profil radial

Le profil radial est analysé à partir des mesures des mêmes quatre capteurs UP (figure 2b) qui permettent d'obtenir la transpiration mesurée de l'arbre. Il est défini à partir des valeurs du rapport des DFS J_i/J_{ref} aux différentes profondeurs i dans lequel J_i est la DFS mesurée par le capteur situé à une profondeur i ($i=30-55, 60-85$ et $90-115mm$) et J_{ref} est la DFS mesurée par le capteur de référence situé à la profondeur 5-30 mm. Pour chaque arbre et chaque saison, le profil est constitué de la moyenne des rapports J_i/J_{ref} sur toutes les dates auxquelles les données étaient exploitables (tableau 1). Pour les trois arbres, le profil radial a pu être déterminé en saison sèche pour la période allant de décembre 2010 à mars 2011. En saison des pluies, le profil radial a pu être déterminé pour la période allant d'avril à mai 2011 sur I7 et K3 et d'avril à octobre 2011 sur K1.

2.6. Les trois méthodes d'extrapolation à la surface totale de l'aubier du flux de sève mesuré sur une portion de sa section

L'extrapolation à toute la section d'aubier d'une mesure réalisée sur une petite portion en considérant la DFS comme homogène ne demande que de connaître la surface totale de l'aubier. Par contre, les calculs respectifs du facteur de correction c et du facteur multiplicateur M nécessitent qu'il y ait une corrélation significative entre les DFS mesurées par les capteurs à des profondeurs autres que celle de référence et la DFS mesurée à la profondeur de référence. Une corrélation significative existe, le plus souvent, au sein des périodes pendant lesquelles le profil est constant et qui correspondent aussi aux périodes pendant lesquelles l'eau n'est pas limitante (Zang et al. 1996, Lu et al. 2000, Delzon et al 2004). C'est pourquoi, dans notre étude, nous avons calculé le facteur de correction c et le facteur multiplicateur M seulement sur les données disponibles en saison des pluies. Cependant les valeurs de c et M obtenues peuvent être utilisées ensuite pour estimer la transpiration quelle que soit la saison (Poyatos et al. 2007). Pour tester la sensibilité du modèle de profil à la profondeur de référence choisie, l'extrapolation a été faite en considérant

successivement comme référence les profondeurs 5-30mm, 0-50mm et 10-20mm (figure 2b, c et d). Par conséquent, pour chaque arbre et pour chacune de ces deux méthodes, trois valeurs de la transpiration ont été calculées.

➤ **Extrapolation sous hypothèse d'homogénéité de la DFS sur toute la section d'aubier**

A partir de l'équation 3, on déduit la transpiration F (en $l. h^{-1}$) à l'échelle de l'arbre, grâce à une estimation de la surface de bois d'aubier A (en dm^2) (Granier, 1985).

$$F = J_{ref} \times A. \quad (4)$$

où J_{ref} = la DFS (J) mesurée sur la portion externe de l'aubier choisie comme référence,

A = surface totale de l'aubier ($\sum_1^i A_i$).

➤ **Extrapolation par le facteur de correction c**

Le facteur de correction c est calculé comme suit (Delzon et al. 2004):

$$c = \sum_{i=1}^n R_i \left(\frac{A_i}{A} \right) \quad (5)$$

$$\text{où } R_i = \frac{\sum_0^{24h} J_i}{\sum_0^{24h} J_{ref}} \quad (6)$$

J_{ref} = DFS mesurée par le capteur de référence considéré (C5-30, C0-50 ou C10-20) en $l.dm^{-2}.h^{-1}$,

J_i = DFS à la profondeur i (figure 2b, c et d) en $l.dm^{-2}.h^{-1}$,

A_i = la surface de l'anneau contenant le capteur inséré à la profondeur i et A = surface totale de l'aubier ($\sum_1^i A_i$) en dm^2 .

La moyenne de c , c_{my} , sur plusieurs jours a été calculée. La transpiration à l'échelle de l'arbre s'en déduit par l'équation :

$$F \text{ (en } l. h^{-1}) = J_{ref} \times A \times c_{my}. \quad (7)$$

➤ **Extrapolation par le facteur multiplicateur M**

L'extrapolation est basée sur l'équation de la courbe d'ajustement de la relation exprimant le rapport J_i/J_{ref} en fonction de la profondeur i de l'aubier. Le flux de sève à l'intérieur de la partie de l'aubier excluant la portion de référence (F_{int}) est (Lu et al. 2000):

$$F_{int} = \int_{i_{ref}}^R J_{ref} * f(i) * 2\pi(R - i) di \quad (8)$$

- i_{ref} = profondeur de référence (5-30, 0-50 ou 10-20mm),
- R = Rayon de la section d'aubier,
- J_{ref} = DFS mesurée par le capteur de référence (C5-30, C0-50 ou C10-20),
- $f(i)$ est l'équation de la courbe d'ajustement de la relation entre le rapport J_i/J_{ref} et la profondeur i de l'aubier, J_i = DFS à la profondeur i (figure 2b, c ou d)
- $2\pi * (R - i)$, la circonférence de la section de l'aubier à la profondeur i ,

Pour déduire le flux total de l'arbre à partir du capteur de référence, on détermine un facteur multiplicatif M tel que :

$$M = \frac{(F_{int} + F_{ref})}{F_{ref}}, \quad (10)$$

où $F_{ref} = J_{ref} \times A_{ref}$ est le flux de sève à la profondeur de référence considérée et A_{ref} = surface de la section intégrée par le capteur de référence.

Ainsi, la transpiration estimée à l'échelle de l'arbre peut être estimée pour tout arbre de diamètre comparable à partir d'une mesure unique à la profondeur du capteur de référence comme suit :

$$F = F_{ref} \times M \quad (11)$$

2.7. Traitements des données et analyses statistiques

Les différents graphiques ont été réalisés sous Excel. Le degré de signification des relations entre les DFS demi-horaires à chaque profondeur i et la DFS demi-horaires aux profondeurs de référence choisies ont été testées par le coefficient de corrélation de Spearman et la méthode de régression linéaire simple sous le logiciel R. Ce même logiciel a été utilisé pour déterminer les équations des courbes d'ajustements qui lient le rapport de la DFS (J_i/J_{ref}) à la profondeur d'insertion des capteurs dans l'aubier. En fonction de la courbe de tendance générale observée sous Excel, nous avons procédé à un ajustement avec le logiciel R par la fonction *nls* (*Nonlinear Least Squares*). La validation de ces ajustements est basée sur les tests de Fisher (significativité des coefficients des modèles) et le R^2 . Pour la comparaison des valeurs de la transpiration estimée par rapport à celles de la transpiration mesurée, nous avons calculé la différence relative entre ces deux valeurs qui est égale au rapport de la transpiration estimée soustraite de la transpiration mesurée sur la transpiration mesurée. La comparaison entre les résultats obtenus par les trois méthodes d'extrapolation a été réalisée par un test de comparaison de moyenne avec échantillons appariés (*wilcox.test*) sous le logiciel R.

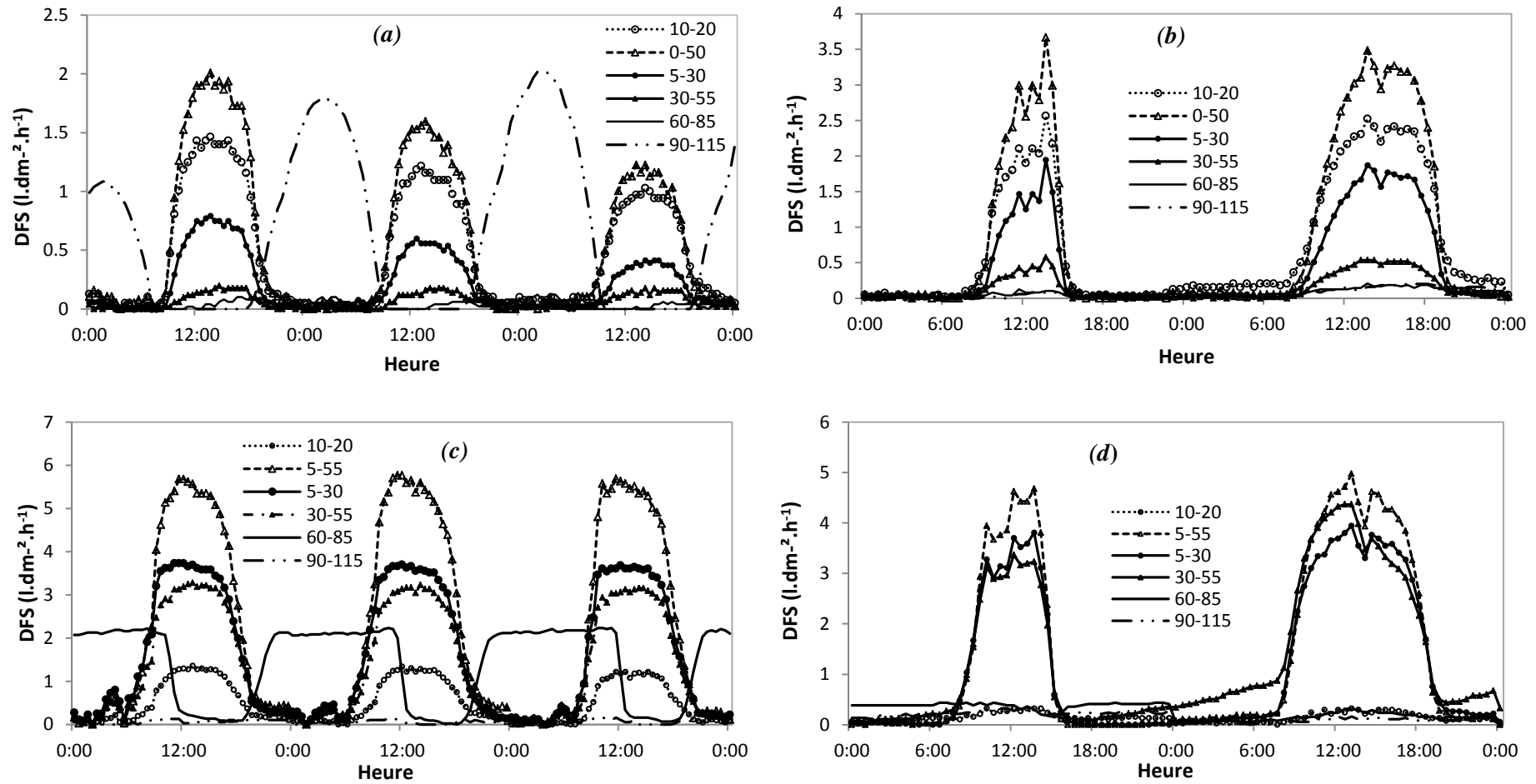


Figure 3 : Variation journalière de la DFS à différentes profondeurs dans l'aubier sur un arbre de *Vitellaria paradoxa* K3 en saison sèche (a) et en saison des pluies (b) et sur un arbre d'*Isobertlinia doka* I7 en saison sèche (c), et en saison des pluies (d). Jours choisis comme représentatifs de la saison sèche : 4-5-6 décembre 2010 pour *I. doka* et 7-8-9 février 2011 pour *V. paradoxa* et pour la saison des pluies pour les deux espèces : 27-28 mai 2011.

3. Résultats

3.1. Variations saisonnière et journalière de la densité du flux de sève

La figure 3 illustre la variation de la densité de flux de sève sur quelques jours représentatifs de chaque saison à toutes les profondeurs auxquelles elle a été mesurée sur K1 en saison sèche (figure 3a) et en saison des pluies (figure 3b) et I7 en saison sèche (figure 3c) et en saison des pluies (figure 3d). Les arbres K3 et I2 montrent les mêmes variations journalières. Quelle que soit l'espèce, la DFS est maximale en fin de matinée, entre 11h30 et 13h, et chute en fin d'après-midi à toutes les profondeurs excepté les profondeurs 90-115mm pour *V. paradoxa* et 60-85 mm pour *I. doka* en saison sèche. Chez les deux espèces à cette saison sur ces capteurs, on observe un flux nocturne important (jusqu'à $2 \text{ l.dm}^{-2}.\text{h}^{-1}$) qui peut devenir supérieur au flux diurne (figure 3a) chez *V. paradoxa*. En saison des pluies, la baisse de la DFS chez les deux espèces en début d'après-midi (figure 3b et 3d), moins nette au-delà de la profondeur 30-55mm, est due à un passage nuageux.

3.2. Variation saisonnière de la transpiration mesurée

Le tableau 2 présente les transpirations moyennes diurnes, nocturnes, journalières (en litres par jour, l.j^{-1}) et les recharges nocturnes (transpiration nocturne/transpiration diurne) calculée pour chaque arbre de chaque espèce. La transpiration moyenne journalière varie de 44 l.j^{-1} (SD= ± 16) à 43 l.j^{-1} (SD= ± 11) chez *V. paradoxa*. Pour *I. doka*, elle est de 114 l.j^{-1} (SD= ± 21), soit plus de deux fois et demi supérieure à la transpiration de *V. paradoxa*. Cependant, les valeurs varient d'une saison à l'autre et cette variation est plus marquée chez *V. paradoxa* que chez *I. doka* (tableau 2). Pour *V. paradoxa*, la recharge nocturne varie de 12.90% à 32.25% de la transpiration diurne en saison sèche et de 13.95% à 14.28% en saison des pluies (tableau 2). Pour *I. doka*, en saison sèche, la recharge nocturne est de 11.76% tandis qu'en saison des pluies, elle est de 10.67% de la transpiration diurne (tableau 2).

3.3. Forme du profil radial du flux de sève

La figure 4 illustre les profils radiaux du rapport de la DFS J_i/J_{ref} en fonction de la profondeur d'insertion des capteurs. Quelle que soit l'espèce, en saison des pluies, le rapport J_i/J_{ref} décroît de la périphérie vers le centre de l'aubier, avec un maximum pour le capteur situé à 5-30mm de profondeur. La décroissance est toujours plus progressive chez *I. doka* que chez *V. paradoxa*. Chez *I. doka*, quelle que soit la saison, le profil est le même et le rapport J_i/J_{ref} est très bas, proche de zéro, pour le capteur situé à 90-115mm de profondeur (figure 4 c et d). Ce résultat atteste que la plus grande partie de la section transpirante de l'aubier a bien été prise en compte par les quatre capteurs. Quant à *V. paradoxa*, en saison des pluies, la DFS

Tableau 2 : Transpiration moyenne journalière ($l.j^{-1}$) estimée en explorant toute la surface de l'aubier avec quatre capteurs par arbre sur les deux espèces sur la période d'étude

<i>Arbre (diamètre)</i>	<i>Saisons</i>	<i>Transpiration diurne ($l.j^{-1}$)</i>	<i>Transpiration nocturne ($l.j^{-1}$)</i>	<i>Transpiration journalière ($l.j^{-1}$)</i>	<i>Transpiration nocturne/transpiration diurne (%)</i>
K1 (32.5cm)	Sèche	31 (15)	4 (2)	35 (15)	12.90
	Pluie	43 (11)	6 (6)	49 (14)	13.95
	Toutes saisons	39 (13)	5 (5)	44. (16)	12.82
K3 (38.5cm)	Sèche	31 (10)	10 (7)	41 (11)	32.25
	Pluie	42 (7)	6 (3)	48 (10)	14.28
	Toutes saisons	34 (11)	9 (5)	43 (11)	26.47
I7 (37.6cm)	Sèche	102 (19)	12 (8)	114 (24)	11.76
	Pluie	103 (12)	11 (3)	114 (12)	10.67
	Toutes saisons	103 (17)	12 (6)	114 (21)	11.65

aux profondeurs 60-85mm et 90-115mm peut atteindre respectivement 12% et 22% de la DFS maximum observée à 5-30mm avec une forte variabilité (écart- type standard, figure 4a). En saison sèche, chez *V. paradoxa*, le rapport J_i/J_{ref} montre une variation radiale opposée et un écart croissant entre les deux arbres à partir de 5-30mm de profondeur (figure 4b). Les valeurs de la DFS à la profondeur 90-115mm et 60-85mm atteignent jusqu'à 218% de la valeur de la DFS à 5-30mm sur K1, et 123% sur K3 (figure 4b).

Les profils radiaux obtenus pour les deux espèces restent presque constants sur une longue période de temps (avril à juin) avec des écarts types très faibles surtout pendant la journée et en saison des pluies (figure 4a et figure 4c). La figure 5 montre la relation entre les valeurs demi-horaires de la DFS à différentes profondeurs i en fonction des profondeurs de références respectives 5-30mm, 0-50mm et 10-20mm. Sur des périodes de 24heures, en saison de pluie, les DFS intégrées par demi-heure à chaque profondeur sont souvent fortement corrélées avec la DFS aux profondeurs de références avec l'ordonnée à l'origine non significativement différent de zéro. La variance expliquée par la régression linéaire (R^2) décroît avec la profondeur de l'aubier considérée quelle que soit la profondeur du capteur de référence. On observe, en effet, souvent un décalage entre l'évolution journalière des flux enregistrés par le capteur de référence et les flux enregistrés par les deux capteurs situés le plus au centre de l'aubier. L'existence de la constance des profils radiaux observés en saison des pluies nous autorisent à extrapoler la transpiration des deux espèces à partir de la mesure de la DFS enregistrée par un capteur unique inséré à la profondeur 5-30mm, 10-20mm ou 0-50mm par de facteurs de correction c et de multiplication M .

3.4. Estimation de la transpiration de l'arbre à partir d'un seul capteur implanté sur la section externe de l'aubier

Le tableau 3 présente les écarts à la transpiration mesurée de la transpiration estimée à partir des trois méthodes d'extrapolation. Quelle que soit la méthode d'estimation utilisée, le calcul de la transpiration à partir du capteur de référence C0-50 surestime de 19.67 à 47.74% la transpiration chez I7, de 90.39 à 141.75% chez K3 et de 115.02 à 181.07% chez K1. Globalement, l'estimation de la transpiration des trois arbres à partir du capteur C5-30 a conduit à une différence moindre avec la transpiration mesurée quelle que soit la méthode utilisée. A partir de ce capteur, les écarts varient de -5.20 à +75.56% chez K1, de - 4.56 à +76.75% chez K3 et de -1.49 à 34.03% chez I7 (tableau 3). Cependant, sur K3, la meilleure estimation de la transpiration est obtenue à partir du capteur C10-20 pour les méthodes qui utilisent le facteur de correction c et le facteur de multiplication M , avec des écarts à la

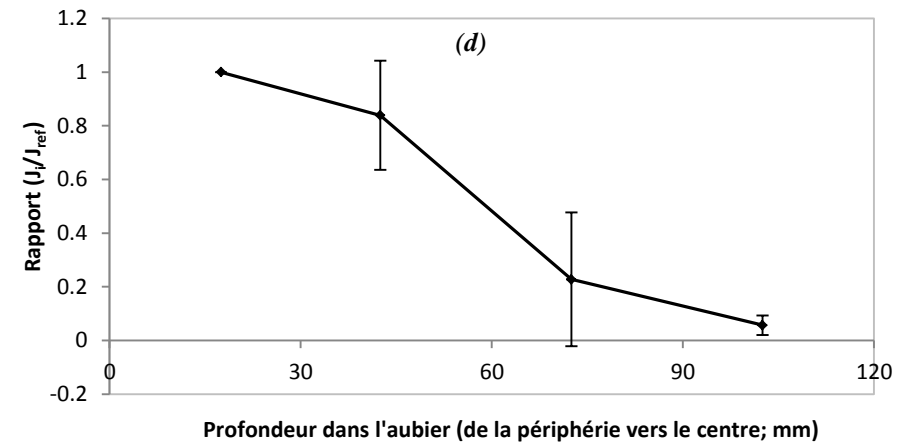
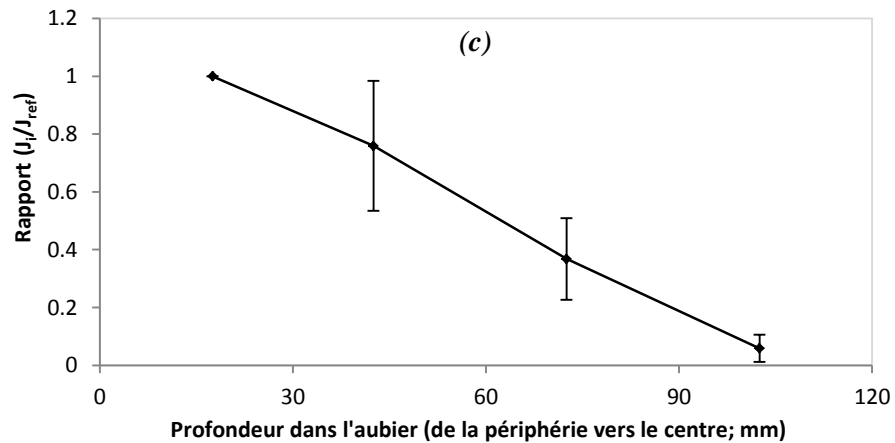
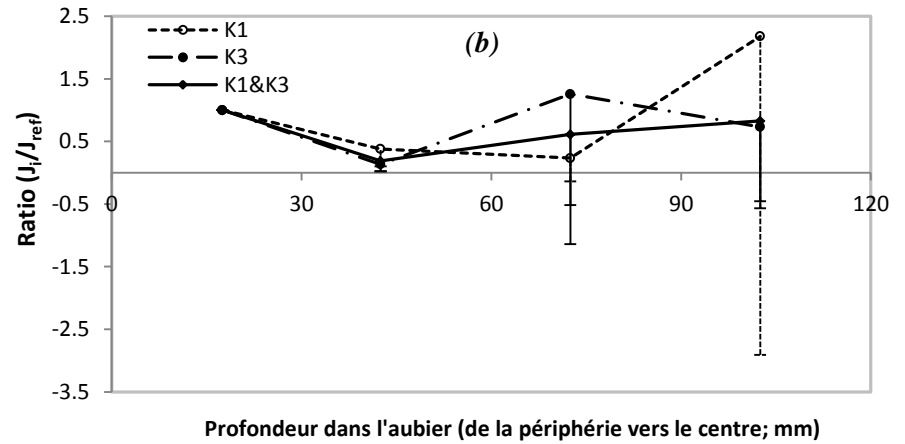
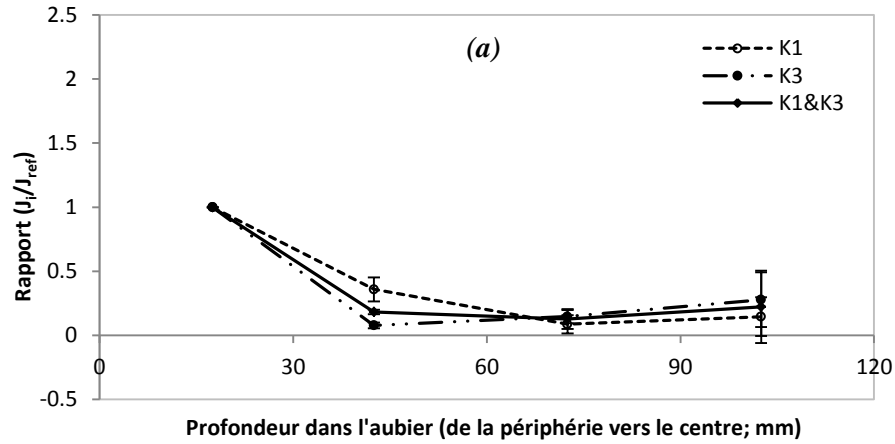


Figure 4 : Rapport de la DFS mesurée à une profondeur i sur la DFS à la profondeur 5-30 mm en fonction de la profondeur d'insertion des capteurs sur les arbres de *V. paradoxa* en saison des pluies (a) et en saison sèche (b) et sur *I. doka* en saison des pluies (c) et en saison sèche (d). Les points indiquent le centre de la section de l'aubier prise en compte par les capteurs insérés respectivement entre : 5-30mm ; 30-55mm ; 60-85mm et 90-115mm. Les barres verticales désignent les écart-types standards. Pour les deux espèces la saison sèche couvre décembre 2010 à mars 2011, la saison des pluies couvrent avril à octobre 2011 pour *V. paradoxa* et avril-mai 2011 pour *I. doka*

transpiration mesurée (+ 3.99% et + 4.22%) qui sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec le capteur C5-30 comme mesure de référence par ces mêmes méthodes (-4.56% et 4.88%).

Parmi les trois méthodes d'estimation de la transpiration expérimentée dans notre étude, la méthode supposant l'homogénéité de la DFS sur la section de l'aubier conduit à plus de biais d'estimation de la transpiration chez les deux espèces quel que soit le capteur de référence utilisé. A partir de cette méthode, les écarts varient de + 75.56 à + 181.07% chez K1, de + 76.75% à 141.75% chez K3 et de -70.68 à 47.74% chez I7. Les deux méthodes prenant en compte le profil radial donnent des valeurs de la transpiration globalement moins biaisées et plus proche des valeurs mesurées à partir des capteurs C5-30 sur les trois arbres et aussi à partir de C10-20 pour K3 (tableau 3).

L'analyse statistique montre qu'il y a une différence significative entre les moyennes obtenues à partir des trois méthodes d'estimation et les moyennes obtenues avec la méthode mesurée ($p < 0.05$) quel que soit le capteur de référence, l'arbre et l'espèce. Néanmoins, au niveau de K3, la transpiration moyenne journalière estimée par extrapolation de la profondeur de référence 5-30mm par les méthodes utilisant les facteurs M et c est statistiquement égale à la transpiration mesurée en prenant comme référence la profondeur 5-30mm.

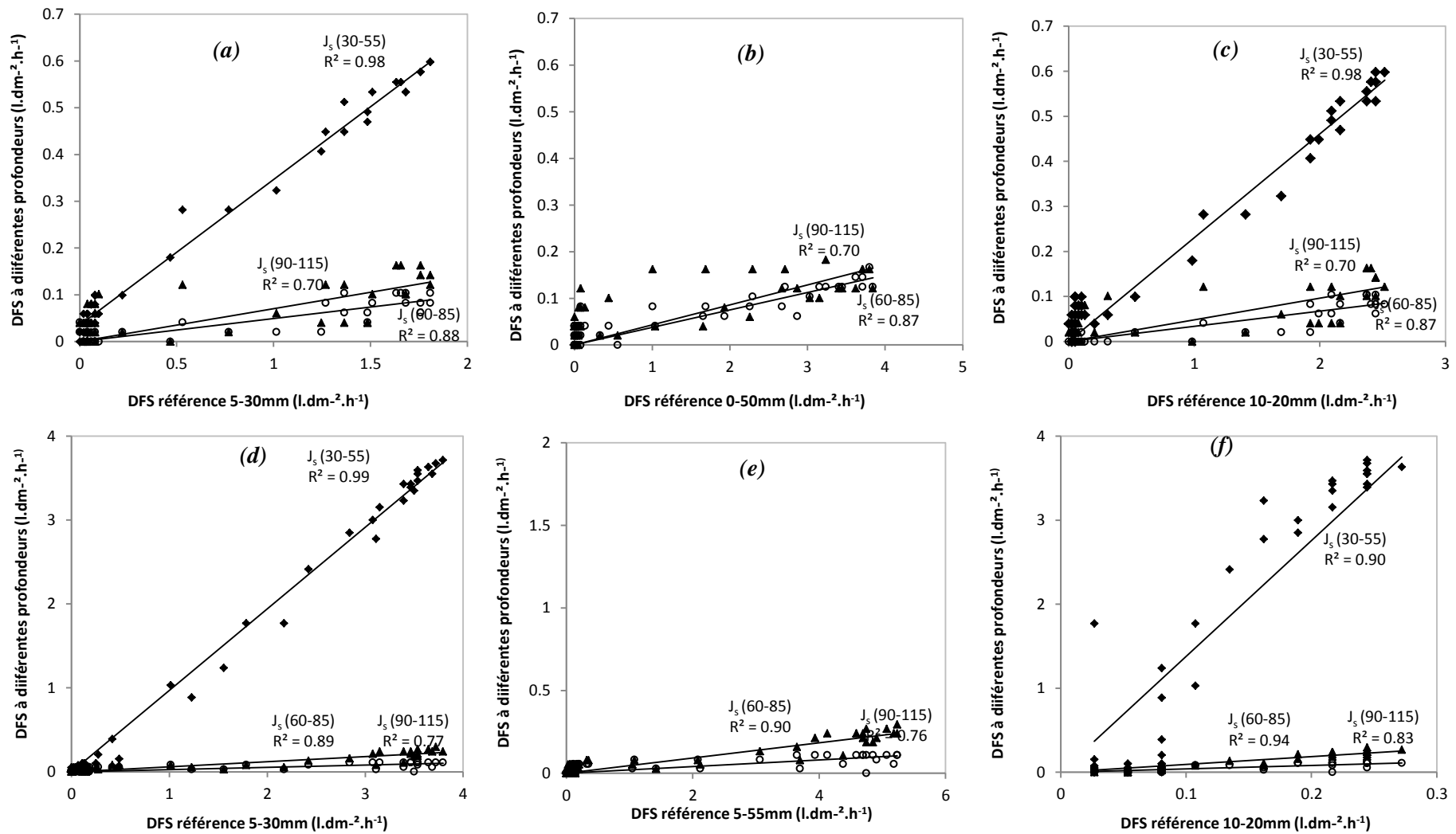


Figure 5 : Relation entre les valeurs demi-horaires de la DFS (J) à différentes profondeurs i en fonction des profondeurs de références respectives 5-30mm, 0-50mm et 10-20mm, chez *V. paradoxa* (a, b, c) et *I. doka* (d, e, f). Chaque nuage de points représente un jour de mesure : le 19 mai 2011 pour *V. paradoxa* et le 02/06/2011: pour *I. doka*.

4. Discussion

Notre travail a permis de quantifier la transpiration journalière sur des arbres de gros diamètre chez les espèces *V. paradoxa* et *I. doka* dans les conditions spécifiques de notre étude. Il a également mis en évidence l'existence d'une variation radiale de la DFS chez ces deux espèces. Il a enfin confirmé que la prise en compte de cette variation dans l'estimation de la transpiration de l'arbre à partir de mesures issues d'un seul capteur via le calcul d'un facteur de correction c ou de multiplication M diminuait la différence avec la transpiration mesurée par rapport à une méthode d'extrapolation supposant l'homogénéité du profil radial.

4.1. Transpiration journalière de *Vitellaria paradoxa* et d'*Isoberlinia doka*

Les différences de valeur de la transpiration journalière observées entre les deux espèces étudiées pourraient s'expliquer par la durée plus longue de renouvellement des feuilles chez *V. paradoxa* (2 à 3 mois) que chez *I. doka* (0 à 2 mois) (Seghieri et al. 2012). Ce phénomène pourrait expliquer aussi la différence (jusqu'à 13 l.j^{-1}) de transpiration observée entre la saison sèche et la saison des pluies chez *V. paradoxa* tandis que chez *I. doka* cette différence est très faible (1 l.j^{-1}). Les résultats que nous avons trouvés chez *V. paradoxa* vont dans le même sens que ceux de Do et al. (2008) chez *Acacia tortilis* au Nord du Sahel. Ces auteurs ont trouvé qu'*A. tortilis* transpire moins au cœur de la saison sèche (8.8 l.j^{-1}) qu'en saison des pluies (25 à 40 l.j^{-1}) et que cette diminution correspond à sa période de feuillaison minimale.

Des estimations directes de la transpiration de *V. paradoxa* et d'*I. doka* à partir de plusieurs capteurs insérés successivement sur toute la section de l'aubier sont, à nos connaissances, absentes de la littérature. Néanmoins, nous pouvons comparer nos résultats avec ceux obtenus sur d'autres espèces tropicales. Des recherches en forêt sèche tropicale au Panama, indiquent que la transpiration d'*Anacardium excelsum*, *Ficus insipida*, *Cordia alliodora*, *Schefflera morototoni* augmente avec le diamètre des arbres et selon les espèces (Meinzer et al. 2003). Elle passe de 46 kg/jour dans des arbres de *Cordia alliodora* de DBH de 0.34m à 750 kg/jour dans des arbres de *Anacardium excelsum* de DBH de 0.98m .

En saison sèche, les proportions de la transpiration diurne due à la recharge nocturne obtenues sur K1 et I7 sont incluses dans les valeurs obtenues (entre 9% et 15%) par Goldstein et al. (1998) sur trois espèces tropicales sempervirentes (*Ficus insipida*, *Luehea seemannii*, *Cecropia longipes*) et deux espèces semi-décidues (*Anacardium excelsum* et *Spondias mombin*) en saison sèche en climat tropical de Panama. Chez K3, la recharge nocturne est deux fois plus élevée que celles de K1 et de I7. Cette situation est due essentiellement à la

Tableau 3 : Comparaison des différences relatives entre la transpiration mesurée et les transpirations estimées de *V. paradoxa* et *I. doka* à partir de trois méthodes d'extrapolation à trois profondeurs de référence différentes. En gras italique, les erreurs d'estimations les plus faibles pour chaque méthode et par arbre.

Arbre	<i>C5-30</i>	<i>C0-50</i>	<i>C10-20</i>	
K1	<i>Différence entre la transpiration mesurée et la transpiration estimée sous l'hypothèse d'homogénéité sur la section d'aubier</i>	+ 75.56	+ 181.07	+ 114.48
	<i>Différence entre la transpiration mesurée et la transpiration estimée avec c</i>	- 5.20	+ 119.25	+ 17.98
	<i>Différence entre la transpiration mesurée et la transpiration estimée avec M</i>	+ 0.60	+ 115.02	+ 22.92
K3	<i>Différence entre la transpiration mesurée et la transpiration estimée sous l'hypothèse d'homogénéité sur la section d'aubier</i>	+ 76.75	+ 141.75	+ 89.03
	<i>Différence entre la transpiration mesurée et la transpiration estimée avec c</i>	- 4.56	+ 88.57	+ 3.99
	<i>Différence entre la Transpiration mesurée et la Transpiration estimée avec M</i>	+ 4.88	+ 90.39	+ 4.22
I7	<i>Différence entre la transpiration mesurée et la transpiration estimée sous l'hypothèse d'homogénéité sur la section d'aubier</i>	+ 34.03	+ 47.74	-70.68
	<i>Différence entre la transpiration mesurée et la transpiration estimée avec c</i>	+ 0.52	+ 21.15	+ 20.51
	<i>Différence entre la transpiration mesurée et la transpiration estimée avec M</i>	- 1.49	+ 19.67	-105.73

concomitance d'une forte valeur de flux nocturne enregistrée sur une quinzaine de jours (27 janvier-11 février 2011) et d'un très faible flux diurne dû à un faible taux de feuillaison (période de renouvellement). Bucci et al. (2004) ont montré que chez *Styrax ferrugineus* (Styracaceae), *Roupala montana* (Proteaceae), et *Ouratea hexasperma* (Ochnaceae), le flux nocturne contribue jusqu'à 13 à 28% de la transpiration diurne en saison sèche dans une savane du sud du Brésil (moyenne annuelle de précipitation 1500mm).

4.2.Variation radiale de la densité de flux de sève

La forme du profil observé chez les deux espèces étudiées, avec une décroissance de l'extérieur vers l'intérieur de l'aubier, est la plus fréquente sur des arbres de grand diamètre, malgré des différences de pente et des valeurs extrêmes. Sur des arbres de *Mangifera indica*, une espèce tropicale, Lu et al. (2000) ont trouvé que le flux de sève est maximum à la périphérie de l'aubier (0-2cm) et décroît vers le centre. Chez *Hevea brasiliensis*, Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010) ont trouvé également que le flux de sève est maximum dans la partie externe de l'aubier, avec des valeurs au centre de l'aubier de 30% de la valeur mesurée à la périphérie. James et al. (2002) ont trouvé en Panama, sur quatre espèces tropicales (*Anacardium excelsum* ; *Ficus insipida*, *Cordia alliodora* et *Schefflera morotoni*) que la DFS est maximale dans les 4 premiers centimètres de profondeur. Cette même forme de décroissance est observée chez *Eucalyptus urophylla* mais avec un flux maximal entre 3 et 4 cm dans l'aubier (Zhou et al. 2002). Des formes similaires ont été également signalées sur plusieurs espèces tempérées comme *Pinus pinaster* (Delzon et al. 2004), *Pinus taeda* (Ford et al. 2004b), *Pinus sylvestris* (Nadezhdina et al. 2002) où le maximum de flux est atteint entre 0 et 20mm ou entre 10 et 30mm de profondeur. Plusieurs hypothèses expliquent ce profil. La DFS en un point donné dépend de la conductivité hydraulique de l'aubier en ce point qui elle-même dépend de la surface foliaire reliée à cette partie (Spicer et Gartner, 2001). En d'autres termes, la vitesse du flux sur une portion de l'aubier reflète la transpiration des feuilles qui y sont reliées. Ainsi, parce que l'aubier interne fournit de l'eau aux vieilles branches et aux feuilles ombragées du bas de la couronne de l'arbre, il n'est pas aussi fonctionnel que l'aubier externe, plus jeune, qui alimente les branches plus jeunes de l'arbre (Dye et al. 1991 ; Jiménez et al. 2002). Cependant, pour Gartner et Meinzer (2005), chez les espèces à feuilles caduques, il n'existerait pas de connexion directe entre les vieilles branches et la portion interne et âgée de l'aubier. La faible conductivité hydraulique au niveau de l'aubier interne pourrait bien être causée par la présence des vaisseaux moins fonctionnels due à leur ancienneté, mais sans lien avec la structure du feuillage (Ford et al. 2004a). Ainsi, la DFS est affectée par les propriétés

internes de chaque bois, incluant la conductivité hydraulique de l'aubier, sa teneur relative en eau et sa gravité spécifique (James et al. 2002). Par conséquent, la plus faible contribution de l'aubier interne à la transpiration totale des arbres par rapport à la section externe s'explique par la combinaison de la plus faible valeur de la DFS et de la plus faible surface d'aubier intégrée par des capteurs insérés dans une profondeur comparable.

4.3. Extrapolation à l'échelle de l'arbre de la transpiration mesurée sur une portion externe de section d'aubier

La plupart des valeurs des coefficients de correction c calculées dans notre étude sont similaires à celles obtenues par d'autres auteurs. Zang et al. (1996) sur *Eucalyptus globulus* ont trouvé des valeurs de c qui varie entre 0.56 et 1.02 à partir de mesures par des capteurs insérés à 15mm et 25mm de profondeur dans l'aubier. Basés sur la même méthode que la nôtre, Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010) ont trouvé une valeur moyenne de c de 0.87 pour *Hevea brasiliensis* à partir d'une extrapolation faite dans la première section externe de l'aubier (entre 100 et 60% à partir du centre de la section de l'aubier). Les valeurs de c que nous avons obtenues se situent également dans la gamme de celles obtenues par Becker (1996) qui varient entre 0.51 à 0.82 (saisons chaude et humide combinées) sur des espèces de forêts tropicales humides à Borneo. Delzon et al. (2004) ont trouvé une valeur de c de 0.6 à 1.0 pour le pin maritime et indique qu'il existe une relation linéaire décroissante entre c et le diamètre des arbres. Inversement, Poyatos et al. (2007), Wullschleger et King (2000) et Tateishi et al. (2010) ont indiqué que la relation entre le diamètre de l'arbre et c n'était pas significative sur *Quercus pubescens*, *Liriodendron tulipifera* et *Fagus crenata*. Quant au facteur multiplicateur M , nous avons trouvé des valeurs inférieures à celles obtenues par Lu et al. (2000) qui varient entre 3.39 et 4.39.

Les valeurs de la transpiration estimée sous hypothèse de l'homogénéité de la DFS sur la section de l'aubier chez K1 (93 $l.j^{-1}$) et K3 (87 $l.j^{-1}$) en saison des pluies, sont largement supérieures à celles obtenues par Servièrre (2010) : 29 à 62 $l.j^{-1}$ pour K1 et 40 à 66 $l.j^{-1}$ pour K3. Nous avons évalué la surface totale de l'aubier à partir du profil radial et estimé la transpiration à partir du capteur en place entre 10 et 20mm. Servièrre (2010) avait évalué la surface d'aubier sur la base d'un abaque DBH-Surface d'aubier et extrapolé la densité de flux de sève mesurée à la profondeur 10-20mm. Néanmoins, si on estime la transpiration à partir du capteur de référence situé entre 10 et 20mm mais en utilisant la surface d'aubier estimée à partir de l'abaque DBH-Surface d'aubier, on trouve le même ordre de grandeur de la transpiration moyenne journalière pour la même saison (44 $l.j^{-1}$ pour K1 et 55 $l.j^{-1}$ pour K3)

que celle calculée par Servièrè (2010). A priori, l'abaque est moins précis que la surface basée sur le profil radial de la DFS de l'arbre même dont on estime la transpiration et les valeurs trouvées dans notre étude devraient donc être plus justes que celles trouvées par Servièrè (2010). En revanche, les valeurs de la transpiration que nous avons estimée par cette méthode sur *V. paradoxa* sont inférieures à celles obtenues par Bayala et al. (2008, 121 l.j⁻¹) dans un parc à karité du Burkina-Faso (précipitation moyenne annuelle : 730 mm). La différence pourrait s'expliquer par la taille plus grande des arbres (68cm de diamètre) étudiés au Burkina-Faso combiné à un meilleur fonctionnement des arbres du fait de soins apportés aux arbres en situation de parcs par rapport à ceux en situation de jachères.

Cependant, nos résultats confirment l'existence d'une différence importante dans l'estimation de la transpiration par la méthode supposant l'homogénéité de la DFS sur la section de l'aubier, différence déjà relevée par plusieurs auteurs mentionnés en introduction. Sur des arbres de *Pinus spp*, Ford et al. (2004a) ont trouvé que l'estimation de la transpiration à partir d'un capteur inséré entre 0 et 10mm de profondeur dans l'aubier conduit à une surestimation de plus de 154% par rapport à la transpiration mesurée. Nadezhdina et al. (2002) ont signalé des erreurs de plus de 300% chez *Pinus sylvestris* à partir de la DFS mesurée à 14 mm de profondeur. Sur quatre espèces tropicales de grands diamètres, James et al. (2002) ont trouvé une surestimation de plus de 100% en extrapolant le flux de sève à partir d'un capteur inséré à 0-20mm de profondeur. Le biais trouvé dans la présente étude sur *V. paradoxa* (-5%) et *I. doka* (0.5%) en utilisant le coefficient de correction *c* est aussi faible que celui trouvé par Poyatos et al. (2007) sur le calcul de la transpiration journalière sur *Quercus pubescens* en climat sub-méditerranéen.

5. Conclusion

Nous avons trouvé une transpiration journalière moyenne chez *Vitellaria paradoxa* et *Isobertinia doka* sur la période de décembre 2010 à mai 2011 de respectivement 44 l.j^{-1} et 114 l.j^{-1} . Nous avons confirmé l'existence d'une variation radiale de la DFS chez *V. paradoxa* comme chez *I. doka* avec des valeurs décroissantes de la périphérie vers le centre de l'aubier. Mais nous avons trouvé un profil qui variait en fonction de la saison chez *V. paradoxa*. Notre étude a confirmé que la prise en compte de cette variation radiale de la DFS dans l'estimation de la transpiration d'un arbre évite les plus grosses erreurs. L'extrapolation par le facteur de correction c et par le facteur multiplicateur M à partir de mesures automatiques par un seul capteur de référence à la profondeur 5-30mm a fourni les meilleures estimations, c'est à dire les plus petites différences avec la transpiration mesurée : $- 5\%$ et $+ 2.5\%$ respectivement pour *V. paradoxa* et $+ 0.5\%$ et $- 1.49\%$ respectivement pour *I. doka*.

Ces résultats sont à confirmer sur un plus grand effectif d'arbres de même classe de diamètre et de classes de diamètre différent pour les deux espèces. L'existence d'une variabilité azimutale du profil est également à vérifier ainsi que l'analyse de l'influence de paramètres environnementaux sur le profil radial, sur la valeur du facteur de correction c et du facteur de multiplication M .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aubreville, A., 1950. Flore forestière Soudano-Guinéenne AOF.-Cameroun-A.E.F. Éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales, Paris.
- Awessou, K. G. B. 2011. Facteurs influençant la transpiration ligneuse en bioclimat soudanien (Nord-Bénin). Rapport de master 1. Laboratoire Hydrosociétés Montpellier, IRD-Université Montpellier 2. 23 p. Montpellier, France.
- Bayala, J., L. K. Heng, M. van Noordwijk, S.J. Ouedraogo. 2008. Hydraulic redistribution study in two native tree species of agroforestry parklands of West African dry savanna. *Acta oecologica* 34: 370-378.
- Becker, P. 1996. Sap flow in Bornean heath and dipterocarp forest during wet and dry periods. *Tree Physiol.* 16:295–299.
- Blanchard, M., Peugeot, C., Seghieri, J., 2007. Structure et dynamique saisonnière de la végétation sur quatre types de couverts végétal représentatifs de la diversité du bassin versant de la Donga, Mémoire de stage, Montpellier, France.
- Bucci, S. J., F. G. Scholz, G. Goldstein, F. C. Meinzer, J. A. Hinojosa, W. A. Hoffmann and A. C. Franco. 2004. Processes preventing nocturnal equilibration between leaf and soil water potential in tropical savanna woody species. *Tree Physiol.* 24:1119–1127.
- Cohen, Y., S. Cohen, T. Cantauarias-Aviles, G. Schiller. 2008. Variations in the gradient of sap velocity in trunks of forest and fruit trees. *Plant Soil.* 305: 49-59
- Delzon, S., M. Sartore, A. Granier and D. Loustau. 2004. Radial profiles of sap flow with increasing tree size in maritime pine. *Tree Physiol.* 24:1285–1293.
- Do, F. and A. Rocheteau. 2002a. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies. *Tree Physiol.* 22:641–648.
- Do, F. and A. Rocheteau. 2002b. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of noncontinuous heating system. *Tree Physiol.* 22:649–654.
- Do, F., Rocheteau A., Diagne A. L., Goudiaby V., Granier A., Lhomme J. P. 2008. Stable annual pattern of water use by *Acacia tortilis* in Sahelian Africa. *Tree Physiology* 28, 95-104.
- Dourma, M., K. Wala, R. Bellefontaine, K. Batawila, K. A. Guelly, K. Akpagana. 2009. Comparaison de l'utilisation des ressources forestières et de la régénération entre deux types de forêts claires à *Isobertia* au Togo. In *Les Bois et forêts tropicaux* (2009). N°302 (4): 5-19.

- Dye, P.J., B.W. Olbrich and A.G. Poulter. 1991. The influence of rowth rings in *Pinus patula* on heat pulse velocity and sap flow measurement. *J. Exp. Bot.* 42:867–870.
- Fiora, A. and A. Cescatti. 2006. Diurnal and seasonal variability in radial distribution of sap flux density: implications for estimating stand transpiration. *Tree Physiol.* 26:1217–1225.
- Ford, C.R., M. A. McGuire, R. J. Mitchell and R.O. Teskey. 2004a. Assessing variation in the radial profile of sap flux density in *Pinus* species and its effect on daily water use. *Tree Physiol.* 24:241–249.
- Ford, C.R., C.E. Goranson, R.J. Mitchell, R.E. Will and R.O. Teskey. 2004b. Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees. *Tree Physiol.* 24:941–950.
- Gartner, B. L. and F.C. Meinzer. 2005. Structure-function relationships in sapwood water transport and storage. In *Vascular Transport in Plants* Eds. N.M. Holbrook and M.A. Zwieniecki. Elsevier/Academic Press, Oxford, U.K., pp 307–318.
- Gebauer, T. V. Horna and C. Leuschner. 2008. Variability in radial sap flux density patterns and sapwood area among seven co-occurring temperate broad-leaved tree species. *Tree Physiol.* 28:1821–1830.
- Gnanglè, P.C. (2005) Parcs à karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn. F) (Sapotaceae) au Bénin: importance socio-économique, caractérisation morphologique et structurale et régénération naturelle. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etude Approfondie (DEA), Univ. Abomey-Calavi, Cotonou (Bénin).
- Goldstein, G., J.L. Andrade, F.C. Meinzer, N.M. Holbrook, J. Cavalier, P. Jackson and A. Celis. 1998. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant Cell Environ.* 21:397–406.
- Granier, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.* 42:193–200.
- Granier, A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stands by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.* 3:309–320.
- Harris, J. 2004. Contribution à l'analyse du fonctionnement d'une végétation Soudano-guinéenne en réponse au climat et à la pression culturale. DESS d gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales, Paris 12 University, France.
- Hatton, T.J. and R.A. Vertessy. 1989. Variability of sapflow in a *Pinus radiata* plantation and the robust estimation of transpiration. In *Proc. Hydrology and Water Resources Symposium*, Christchurch, New Zealand, pp 6–10.

- Hatton, T. J., E. A. Catchpole and R.A. Vertessy. 1990. Integration of sapflow velocity to estimate plant water-use. *Tree Physiol.* 6:201–209.
- Isarangkool Na Ayutthaya, S., F.C. Do, K. Pannengetch, J. Junjittakarn, J.-L. Maeght, A. Rocheteau and H. Cochard. 2010. Transient thermal dissipation method of xylem sap flow measurement: multi-species calibration and field evaluation. *Tree Physiol.* 30:139-148.
- James, S. A., M. J. Clearwater, F.C. Meinzer and G. Goldstein. 2002. Heat dissipation sensors of variable length for the measurement of sap flow in trees with deep sapwood. *Tree Physiol.* 22:277–283.
- Jiménez, M. S., N. Nadezhdina, J. Cermák and D. Morales. 2000. Radial variation in sap flow in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. *Tree Physiol.* 20:1149–1156.
- Lawin, E.A., 2007. Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la Haute Vallée de l’Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA-CATCH Bénin. PhD, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- Lu, P., W. J. Muller and E. K. Chacko. 2000. Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions. *Tree Physiol.* 20:683–692.
- Luttschwager S. and R. Remus. 2007. Radial distribution of sap flux density in trunks of a mature beech stand. *Ann. Sci. For.* 64:431–438.
- Meinzer, F. C., S. A. James, G. Goldstein and D. Woodruff. 2003. Whole-tree water transport scales with sapwood capacitance in tropical forest canopy trees. *Plant, Cell and Environment.* 26: 1147-1155.
- Nadezhdina, N., J. Cermák and R. Ceulemans. 2002. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors. *Tree Physiol.* 22:907–918.
- Poyatos, R. J. Cermák and P. Llorens. 2007. Variation in the radial patterns of sap flux density in pubescent oak (*Quercus pubescens*) and its applications for tree and stand transpiration measurements. *Tree Physiol.* 27:537-548.
- Saveyn, A. K. Steppe and R. Lemeur. 2008. Spatial variability of xylem sap flow in mature beech (*Fagus sylvatica*) and its diurnal dynamics in relation to microclimate. *Botany* 86: 1440-1448.

- Seghier, J., F.C. Do, J. L. Devineau and A. Fournier. 2012. Phenology of Woody Species Along the Climatic Gradient in West Tropical Africa. In TechOpen book Chapter 9. 144-178. Phenology and climate change, ISBN: 978-953-51-0336-3.
- Servière, M. 2010. Les variations de la transpiration de la strate ligneuse en environnement soudano-guinéen. Mémoire pour l'obtention du master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, option : eau. 2IE, HSM et IRD. 79p.
- Spicer, R. and B.L. Gartner. 2001. The effects of cambial age and position within the stem on specific conductivity in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) sapwood. *Trees* 15:222–229.
- Tateishi, M., T. Kumagai, Y. Suyama, T. Hiura. 2010. Differences in transpiration characteristics of Japanese beech trees, *Fagus crenata*, in Japan. *Tree Physiol.* 30: 748–760.
- Wullschleger, S. D. and A.W. King. 2000. Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow poplar trees. *Tree Physiol.* 20:511–5180.
- Zang, D., C.L. Beadle and D.A. White. 1996. Variation in sapflow velocity in *Eucalyptus globulus* with position in sapwood and use of a correction coefficient. *Tree Physiol.* 16:697–703.
- Zhou, G. Y., Z. H. Huang., J. Morris, Z. A. Li, J Collopy, N.N. Zhang, J.-Y. Bai. 2002. *Acta Botanica Sinica* 44 (12): 1418-1424.

RESUME

Dans la présente étude nous avons estimé la transpiration de deux espèces d'arbres à partir des capteurs insérés à des profondeurs successives pour prendre en compte toute la section de l'aubier. Nous avons également analysé la forme du profil radial de la densité de flux de sève (DFS) de ces deux espèces et comparé les écarts à la transpiration mesurée des résultats de trois méthodes d'extrapolation de la transpiration estimée à partir d'une mesure ponctuelle. L'expérimentation a été conduite sur deux arbres de *Vitellaria paradoxa* et un arbre d'*Isoberlinia doka*. La DFS (J) a été mesurée aux profondeurs successives suivantes i dans l'aubier: 5-30, 30-55, 60-85 et 90-115 mm, par la méthode transitoire de dissipation thermique. Les résultats indiquent que *V. paradoxa* transpire en moyenne 44 l.j^{-1} par jour et *I. doka* 114 l.j^{-1} . Pour les deux espèces, le rapport de flux de sève ($J_i/J_{ref(3-50mm)}$) décroît de la périphérie vers le centre de l'aubier avec un maximum entre 5 et 30mm. Chez les deux espèces, les deux méthodes tenant compte de la forme du profil radial à partir d'une mesure de référence à la profondeur 5-30mm, donnent l'estimation de la transpiration la plus proche de la valeur mesurée. Les écarts obtenus par ces méthodes sont respectivement de -1.49 à +0.52 % chez *I. doka* et de -5.20% à 4.80% chez *V. paradoxa*.

Mots clés : *profil radial, transpiration, facteur de correction, facteur de multiplication, Isoberlinia doka, Vitellaria paradoxa, climat soudano-guinéen.*

ABSTRACT

We estimated the transpiration of two species of trees from sensors inserted at successive depths to take into account the entire section of the sapwood. We also analyzed the shape of the radial profile of the sap flux density (DFS, J) of these two species and compared the differences in transpiration measured of the results of three methods of extrapolation of transpiration estimated from a punctual measure. The experiment was led on two trees of *Vitellaria paradoxa* and one tree of *Isoberlinia doka*. J was measured at successive depths in the sapwood following i : 5-30, 30-55, 60-85 and 90-115mm, by the method of transient thermal dissipation. Results indicate that *V. paradoxa* transpire on average 44 l.day^{-1} and *I. doka* 114 l.day^{-1} . For both species, the sap flow ratio ($J_i/J_{ref(3-50mm)}$) decreases from the periphery to the center of the sapwood with a maximum between 5 and 30mm. For both species, the two methods taking into account the shape of the radial profile based on measurement of the depth reference 5-30mm, give the estimate of transpiration closest to the measured value. The differences obtained by these methods are respectively -1.49 to +0.52% in *I. doka* and -5.20% to +4.80% in *V. paradoxa*.

Keywords: *radial profile, transpiration, correction factor, multiplication factor, Isoberlinia doka, Vitellaria paradoxa, Sudano-Guinean climate.*