



REPUBLIQUE DU SENEGAL

** Un Peuple-Un But-Une Foi **

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA
RECHERCHE ET DE L'INNOVATION



UNIVERSITE DE THIES

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'AGRICULTURE (ENSA)

Département des Productions Végétales

Mémoire de fin d'études

Thème :

Evaluation de la transpiration par mesure du flux de sève chez l'espèce agroforestière *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. dans un site semi-aride du bassin arachidier au Sénégal.

Présenté et soutenu le 13 Juillet 2020 par :

M^{lle} Khalisse DIOUF

Pour l'obtention du **diplôme d'ingénieur agronome**

Option : **Productions Végétales**

Devant le jury composé de :

Pr. Saliou NDIAYE	Enseignant chercheur, ENSA/UT	Président du jury
Pr. Ibrahima DIEDHIOU	Enseignant chercheur, ENSA/UT	Encadrant
Dr. Olivier ROUPSARD	Chercheur, CIRAD	Encadrant
Dr. Mame Sokhna SARR SAMBOU	Chercheuse, CNRF/ISRA	Encadrante
M. Massamba THIAM	Enseignant chercheur, ENSA/UT	Membre

« *La chance est divine,
le travail est humain* »

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mon regretté père Magatte DIOUF arraché à notre amour et affection le 03 décembre 2018, nos cœurs meurtris mais notre foi toujours en bandoulière nous allons toujours prier pour le repos de ton âme. Père, je profite également de cette occasion pour te remercier pour tout ce que tu as fait pour nous.

A ma regrettée tante Seynabou SALL que le bon Dieu vous pardonne, qu'il accepte nos prières formulées à vos endroits et qu'il vous accueille dans son paradis.

Merci un maigre mot pour exprimer toute ma gratitude à l'endroit de mon adorable maman Daba SALL qui s'est toujours battue pour notre réussite et notre bonheur. Que Dieu te protège, qu'il te donne une santé de fer, une longue vie afin que tu puisses voir le fruit de tes efforts.

A Tante Bineta SALL et son mari tonton Cheikh DIOP qui n'ont cessé de m'accompagner durant tout mon cursus scolaire, merci pour votre affection très sincère.

A mes oncles Mbissane SALL, Djiguel SALL et Cheikh Issa SALL.

A mes frères et sœurs Amadou, Youssou, Nar, Maissa, Mor, Cheikh, Mamadou, Ndella, Sena, Mère Sène et Mère Ciss.

A Yaye Ndeye, Thiât et Doudou je vous dédie particulièrement ce travail pour m'avoir assisté tout au long de ma formation en me comprenant parfaitement chaque fois que de besoin, même au prix d'un renoncement, succès à vous.

A mes neveux et nièces Khady, Mamadou, Fallou, Maga, Maman, Matar votre badiène vous adore.

A mes filles et fils Maty, Salla, Nabou, Moussa, Ameth, mention spéciale à mon chéri Gorgui et à Samba KANE mon hisbou préféré.

A mes amies Kadia BARRO, Fat Binetou FAYE, Elisa SENE, Khadija NDJIM, Adja BEYE merci pour votre marque d'estime.

A ma voisine de tous les temps Awa Marie Coll CISSE merci pour tous ces 5 ans passés à tes côtés.

A mes adorables filleuls de la 38^e promotion Ndeye Awa DIOP et Elhidji Malick DIOUF.

A mes frères et aînés de l'ENSA Omar Cisse SOW, Mor SALL, Aliou KOUYATE, Aliou NDIAYE, Abdourahmane DIOP, Fallou SECK,

Remerciements

Je rends grâce à Dieu, le miséricorde, le tout miséricordieux, qui m'a donné la chance d'intégrer cette illustre école, de suivre ma formation et de réaliser ce mémoire de fin d'études dans de bonnes conditions. Mes remerciements iront à l'endroit de :

Dr. Frédéric DO, mon maître de stage pour ses avis très pertinents, sa collaboration fructueuse, l'aide et le temps très précieux accordé pour parfaire au mieux ce travail, et pour nous avoir fait l'honneur de nous encadrer et de s'être consacré tout au long du processus d'élaboration de ce mémoire.

Dr. Mame Sokhna SARR SAMBOU, chargée de recherche au CNRF qui a bien voulu m'accompagner et m'assister durant cette période et qui n'a ménagé aucun effort pour la réussite de ce travail. Je lui suis redevable indéfiniment notamment durant tout le stage pour sa disponibilité et ses conseils.

Pr. Ibrahima DIEDHIOU, Directeur de l'École Nationale Supérieure d'Agriculture, mon maître de stage une personne humble, rigoureuse, honnête, généreuse et pragmatique. Merci pour votre soutien moral, vos conseils et votre assistance sans faille.

Dr. Mamadou Tandiang DIAW, Directeur des études de l'ENSA.

M. Massamba THIAM, Chef du département des Productions Végétales pour sa compréhension, je le remercie sincèrement pour tout ce qu'il a fait pour nous.

Dr. Abdoulaye DRAME, pour son accompagnement, sa disponibilité ainsi que ses conseils très précieux. À travers lui, je remercie tous les professeurs du département pour nous avoir donné les outils nécessaires afin d'appréhender plus facilement ce travail.

M. Alain ROCHETEAU, qui avec son assistance technique a permis ce travail.

Dr. Olivier ROUPSARD, chercheur au CIRAD sa rigueur, son humilité ainsi que ses conseils très précieux durant tout le stage m'ont marqué à jamais.

Au personnel du CNRF, plus particulièrement à **Mouhamadou Bamba THIOYE** pour son soutien durant tout le stage.

À mes camarades de promotion.

À tous les membres de **Nouroul Maha Hidi**.

A tous les **mbourois de l'ENSA**.

Table des matières

Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Résumé	vii
Abstract	viii
Liste des sigles et acronymes	ix
Liste des cartes	xi
Liste des figures	xi
Liste des photos	xii
Liste des tableaux	xii
Introduction	- 1 -
Chapitre I : Synthèse bibliographique	- 4 -
1. Présentation de <i>Faidherbia albida</i>	- 4 -
1.1. Répartition géographique	- 5 -
1.2. Importance	- 5 -
2. Bases physiques de la transpiration et du cycle de l'eau	- 6 -
2.1. Bilan hydrique du sol.....	- 6 -
2.2. Bilan d'énergie et conductance du couvert.....	- 7 -
2.3. Equation de Penman-Monteith	- 7 -
2.4. Evapotranspiration potentielle de référence ETo	- 8 -
2.5. Réponse aux principaux facteurs de l'environnement.....	- 8 -
2.6. Relation avec flux de sève et potentiel hydrique foliaire	- 9 -
3. Méthodes d'estimation de la transpiration	- 9 -
3.1. Via les échanges gazeux	- 9 -
3.1.1. Méthode des écoulements turbulents	- 9 -

3.1.2.	Chambre d'assimilation et de transpiration.....	- 10 -
3.2.	Via le flux de sève xylémienne.....	- 10 -
3.2.1.	Transmission de chaleur.....	- 11 -
3.2.2.	Bilan de chaleur.....	- 11 -
3.2.3.	Dissipation de chaleur.....	- 13 -
4.	Transpiration des ligneux et agroforesterie en Afrique de l'Ouest.....	- 16 -
Chapitre II : Matériel et méthodes.....		- 17 -
1.	Zone et site d'étude.....	- 17 -
1.1.	Situation géographique de la zone de l'étude.....	- 17 -
1.2.	Climat.....	- 17 -
1.3.	Types de sol.....	- 18 -
1.4.	Hydrologie.....	- 18 -
1.5.	Flore et matériel végétal.....	- 19 -
2.	Méthodes.....	- 20 -
2.1.	Détermination de la surface conductrice.....	- 22 -
2.2.	Estimation de la transpiration.....	- 23 -
2.2.1.	Profil radial.....	- 24 -
2.2.2.	Densité de flux moyenne.....	- 24 -
2.3.	Potentiel hydrique foliaire.....	- 24 -
2.4.	Humidité du sol.....	- 25 -
2.5.	Données climatiques et estimation de l'évapotranspiration.....	- 26 -
2.6.	Taux de feuillaison et circonférence des individus.....	- 27 -
2.7.	Analyse des données.....	- 27 -
Chapitre III : Résultats.....		- 28 -
1.	Conditions climatiques et cycle phénologique.....	- 28 -
2.	Potentiels hydriques foliaires.....	- 29 -
3.	Densité de flux horaire.....	- 30 -

4.	Variabilité azimutale de la densité de flux	- 32 -
5.	Variabilité radiale de la densité de flux	- 33 -
6.	Dynamique moyenne du flux total	- 35 -
7.	Influence du taux de feuillaison et de l'ETo sur la dynamique du flux.....	- 36 -
8.	Effet de la dimension des individus.....	- 38 -
8.1	Densité de flux et circonférence.....	- 38 -
8.2	Flux total et circonférence.....	- 38 -
9.	Possibilité de prédiction de la transpiration ?	- 39 -
Chapitre IV : Discussion		- 42 -
Conclusion.....		- 47 -
Références bibliographiques		- 48 -

Résumé

La présente étude vise à quantifier la transpiration journalière de l'espèce agroforestière *Faidherbia albida* en saison sèche par une méthode thermique de mesure du flux de sève. Elle a été conduite dans le parc agroforestier de Sob de l'observatoire de Niakhar au Sénégal (bassin arachidier). Un échantillon de cinq individus avec un gradient de dimension a été suivi en continu par la mesure du flux de sève durant la phase de défeuillaison. La densité de flux est mesurée par la méthode de dissipation thermique transitoire. Le capteur est constitué d'une aiguille unique contenant un thermocouple cuivre-constantan avec autour un enroulement chauffant. Les aiguilles sont insérées dans le xylème du tronc selon différents azimuts et un profil radial centripète. Le système réalisait une mesure automatique toutes les 30 mn avec un chauffage intermittent de 10 mn puis une coupure de 20 mn. Les conditions météorologiques et le profil hydrique jusqu'à 1 m de profondeur sont aussi enregistrés automatiquement toutes les 30 mn. Enfin le taux de feuillaison et le potentiel hydrique foliaire (de base et minimum) sont quantifiés mensuellement. La transpiration journalière est estimée par cumul du flux total de sève passé dans le tronc. Ce dernier est calculé en déterminant le profil radial moyen de la densité de flux de sève et en l'affectant aux surfaces conductrices correspondantes. Les résultats de l'étude ont montré que la consommation maximale d'eau durant la période de défeuillaison est de 121 l/arbre/jour soit 0,06 mm/jour compte tenu de la densité de 6,8 arbres par ha. Il y a une forte variabilité azimutale de la densité externe de flux de sève dans les troncs avec un effet individu. Le profil radial de densité de flux présente une forte décroissance, de 60% de l'extérieur vers l'intérieur du xylème. La densité maximale externe de flux de sève montre aussi un effet individu significatif et une tendance positive avec la circonférence du tronc. La transpiration journalière des individus est fortement corrélée avec la circonférence des troncs ($R^2=0,87$) et le taux de feuillaison ($R^2=0,82$). Ces relations ont permis de proposer un modèle statistique simple d'estimation de la transpiration durant la saison sèche.

Mots clés : densité de flux de sève, dissipation thermique transitoire, *Faidherbia albida*, Niakhar, profil radial, transpiration.

Abstract

This present study aims to quantify *Faidherbia albida* daily transpiration, an agroforestry specie, in the dry season by a thermal dissipation method sap flow measurements. A field trial was carried out in an agroforestry parkland at Sob of Niakhar ecosystem observatory in Senegal (groundnut basin). A sample of five individuals with a size gradient was continuously monitored by measuring sap flow during the defoliation phase. The flux density was measured by the transient heat dissipation method. The sensor consists of a single needle containing a copper-constantan thermocouple with heating coil around it. The needles were inserted into the xylem of the trunk at different azimuths and a centripetal radial profile. The system carried out an automatic measurement every 30 minutes with an intermittent heating of 10 minutes and then cut-off of 20 minutes. Weather conditions and water profile down to depth of 1 m were also recorded automatically every 30 minutes. Finally, leafing rate and leaf water potential (predawn and minimum) were monthly quantified. Daily transpiration was estimated by cumulating the total flow of sap passed through the trunk. The latter was calculated by determining mean radial profile of sap flow density and assigning it to corresponding conductive surfaces. Results of study showed that the maximum water consumption during leaf removal period was 121 l/tree/day or 0.056 mm/day according tree density of 6.8 tree/ha. There was a strong azimuthal variability of external density of sap flow in trunks with an individual-tree effect. Radial profile of flux density showed a strong decrease of 60% from outside to inside xylem. The maximum external sap flow density also showed significant individual-tree effect and a positive trend with trunk circumference. Daily transpiration of individuals was strongly correlated with trunk circumference ($R^2=0.87$) and leafing rate ($R^2=0.82$). These relationships made it possible to propose a simple statistical model for estimating transpiration during dry season.

Keywords : *Faidherbia albida*, Niakhar, radial profile, sap flow density, transient thermal dissipation, transpiration.

Liste des sigles et acronymes

CNRF : Centre National de Recherches Forestières

CTD : Constant Thermal Dissipation

CTFT : Centre Technique Forestier Tropical

CV : Coefficient de Variation

DHP : Diamètre à Hauteur de Poitrine

ENSA : Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture de Thiès

ETo : Evapotranspiration Potentielle

FAO : Fonds des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

ISRA : Institut Sénégalais de Recherche Agricole

J : Densité de flux (l/dm²/h)

NTG : Natural Thermal Gradient

OPSE : Observatory Population Health Environment

Q_e : Flux total estimé par le modèle, ce qui explique le « e »

Q_m : Flux total mesuré, ce qui explique le « m »

RAMSES II : Roles of Agroforestry in Sustainable Intensification of Small farms and Food Security for Societies in West Africa

SFD : Sap Flux Density

TA : Tronc Azimutal

TDR : Time Domain Reflectometry

TR : Tronc Radial

TTD : Transient Thermal Dissipation

VPD : Vapour Pressure Deficit

Ψ_b : Potentiel hydrique foliaire de base

Ψ_m : Potentiel hydrique foliaire minimum

Ψ_{bc} : Potentiel hydrique foliaire de base mesuré avec la méthode optimisée avec du coton imbibé

Ψ_{mc} : Potentiel hydrique foliaire minimum mesuré avec la méthode du coton imbibé

Liste des cartes

Carte 1: Situation géographique de la zone d'étude.....	- 17 -
Carte 2: Carte hydrologique de la zone d'étude source (IRD, 2018).....	- 18 -

Liste des figures

Figure 1 : Système TTD avec une sonde unique de type Granier (Do et al., 2018).	- 14 -
Figure 2 : Elevation de la température avec le système TTD (Do et al., 2018), au cours des 10 min après le chauffage de la sonde unique, et selon 3 niveaux de débit de sève.	- 15 -
Figure 3 : Dispositif d'insertion des fluxmètres sur une section transversale de la tige (disque) vue d'en haut.	- 21 -
Figure 4 : Evolution saisonnière du stock hydrique du sol (jusqu'à une profondeur de 1 m), des précipitations, de l'ETo et du taux de feuillaison moyen du peuplement.	- 28 -
Figure 5 : Evolution saisonnière des potentiels hydriques foliaires de base et minimum..	- 29 -
Figure 6 : Cinétiques horaires de la densité externe de flux et du VPD du 14/04/19 pour les cinq individus.....	- 31 -
Figure 7 : Hystérésis de la relation entre la densité de flux et le VPD du 14/04/19.	- 31 -
Figure 8 : Exemple de variabilité azimutale du 14 au 16/04/2019 correspondant à la période de forte feuillaison pour l'individu 46.	- 32 -
Figure 9 : Synthèse des ordres de grandeurs des coefficients de variation (CV) de la densité azimutale.	- 33 -
Figure 10 : Profil radial moyen des cinq individus.	- 34 -
Figure 11 : Variabilité radiale du rapport densité de flux interne par rapport à la valeur la plus externe (J/J_i) par individu.....	- 35 -
Figure 12 : Dynamique de la feuillaison, du flux total et de l'ETo durant la période de l'étude.	- 36 -
Figure 13 : Relation entre la feuillaison, l'ETo et le flux total.	- 37 -
Figure 14 : Relation entre Q_m/ETo et le taux de feuillaison.	- 37 -
Figure 15 : Relation entre la circonférence et la densité de flux à différentes périodes de défeuillaison.	- 38 -
Figure 16 : Relation entre les flux total et la circonférence à différentes périodes de défeuillaison.	- 39 -

Figure 17 : Relation entre le flux total mesuré (Q) et le flux estimé par le modèle (Qe). ... - 41 -

Liste des photos

Photo 1: Illustrations botaniques du <i>Faidherbia albida</i>	- 6 -
Photo 2: Site d'étude avec la tour à flux	- 19 -
Photo 3: Un exemple d'arbre suivi.....	- 19 -
Photo 4: Tronc équipé de fluxmètres	- 21 -
Photo 5: Centrale d'acquisition des données.....	- 22 -
Photo 6: Chambre à pression de Scholander	- 25 -
Photo 7: Sondes TDR.....	- 26 -

Liste des tableaux

Tableau 1: Tableau récapitulatif de calcul de surface conductrice des anneaux.....	- 23 -
Tableau 2: Résultats d'analyse de variance des effets date, individu et interaction date x individu des potentiels hydriques foliaires.	- 30 -
Tableau 3: Résultats de l'analyse de la variance du cumul journalier de la densité de flux.-	- 35 -
Tableau 4: Paramètres du modèle de prédiction de la transpiration.	- 40 -

Introduction

Buttoud (2013) stipule que des millions de personnes pourraient échapper à la pauvreté, à la faim consécutive et à la dégradation de l'environnement si les États déployaient plus d'efforts pour promouvoir l'agroforesterie. Ce dernier désigne les systèmes d'utilisation des terres et les pratiques dans lesquels les plantes ligneuses sont délibérément intégrées aux cultures agricoles et/ou à l'élevage pour une variété de bénéfices (FAO, 2013).

Dans les pays de l'Afrique de l'Ouest, l'agriculture de subsistance intègre généralement l'arbre dans le système de culture (Boffa, 2000) et l'agroforesterie est une pratique courante. Ainsi, une diversité de technologies agroforestières a été recensée dont les parcs agroforestiers ; Bounkougou et *al.* (1994) les définissent comme « un système d'utilisation des terres dans lequel les végétaux ligneux pérennes sont délibérément conservés en association avec les cultures et/ou l'élevage dans un arrangement spatial dispersé et où existent à la fois des interactions écologiques et économiques entre les ligneux et les autres composantes ». Vraisemblablement l'un des parcs agroforestiers les plus répandus en Afrique de l'Ouest est le parc à *Faidherbia albida* (Smektala et *al.*, 2005).

Faidherbia albida (Del.) A. Chev. (Synonyme *Acacia albida* Del.) est une espèce ligneuse de première importance dans les terres agricoles du Sénégal et plus particulièrement dans le Bassin arachidier (Loupe et *al.*, 1988). Selon Giffard (1974), *F. albida* est un arbre dont les propriétés agro écologiques sont connues et exploitées depuis longtemps par les Sérères qui ont su très bien l'intégrer dans leur système agrosylvopastoral. Elle améliore la fertilité des sols par le biais d'un processus de fixation d'azote (Giller, 2001), du recyclage des éléments nutritifs (Sileshi, 2016) et de la matière organique accumulée dans le sol (Gelaw et *al.*, 2015). *F. albida* est connue pour sa phénologie inversée : elle perd ses feuilles en saison des pluies et est en feuillaison en saison sèche (Wickens, 1969). Le métabolisme de cette espèce a toujours intéressé les agronomes et les agriculteurs. La maîtrise de ses propriétés physiologiques est d'autant plus importante pour comprendre de manière approfondie sa relation avec son substrat ainsi qu'avec la flore qui s'y développe. Les mesures thermiques de flux de sève xylémienne sont des méthodes relativement simples pour estimer la transpiration des espèces ligneuses (Flo et *al.*, 2019). Cependant les données de transpiration saisonnière d'espèces agroforestières et sylvopastorales sont assez rares en Afrique (Roupsard et *al.*, 1999 ; Do et *al.*, 2008 ; Awessou et *al.*, 2017 ; Bazié et *al.*, 2018 ; Buyinza et *al.*, 2019). Ces données sont encore plus rares sur

F. albida, au stade jeune (Roupsard et *al.*, 1998) et au stade adulte (Roupsard et *al.*, 1999 ; Bayala et *al.*, 2008). Ainsi la présente étude se propose de quantifier les prélèvements hydriques de *F. albida* par une méthode thermique de mesure du flux de sève. L'étude s'insère dans le cadre du projet Roles of Agroforestry in Sustainable Intensification of Small farms and Food Security for Societies in West Africa (RAMSES II) qui étudie les possibilités et les conditions d'une intensification durable de l'agroforesterie en Afrique de l'Ouest. Elle a été réalisée sous la codirection de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), du Centre National de Recherches Forestières (CNRF) et de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture (ENSA) de Thiès. Elle s'est concentrée sur le parc *F. albida* de l'observatoire de Niakhar, sur le site « Faidherbia-Flux ¹ » de Sob, dans la région de Fatick (Roupsard et *al.*, 2019 ; Roupsard et *al.*, 2020).

Elle a tenté de vérifier les hypothèses suivantes :

- *F. albida* subirait une faible contrainte hydrique en saison sèche liée au caractère phréatophyte des arbres matures et à la profondeur modérée de la nappe, entre 5 et 6 m dans la zone ;
- en se basant sur les travaux de Roupsard et *al.* (1999), l'on suppose que pour un individu ayant un diamètre moyen de 50 cm la consommation maximale d'eau se situerait entre 100 et 200 l ; la densité de flux de sève maximale varierait entre 1 et 3 l.dm⁻².h⁻¹ dans l'anneau externe du xylème. Il y aurait une forte variabilité azimutale et une forte décroissance radiale centripète de la densité de flux dans le tronc ;
- la variation inter-journalière du flux total serait surtout fonction de la demande évaporative et du taux de feuillaison qui est un indicateur de la surface foliaire ;
- il existerait une forte relation positive entre la transpiration et la circonférence des troncs, la densité de flux ne variant pas avec la circonférence.

En cohérence avec les hypothèses formulées, l'objectif général de cette étude est de quantifier la transpiration de *F. albida* et de caractériser ses principaux facteurs de contrôle en saison sèche. Le but final est de pouvoir proposer les bases d'un modèle d'estimation de la transpiration du peuplement.

¹ AGRAF / Faidherbia-Flux: <http://agraf.msem.univ-montp2.fr/Senegal.html>

Plus spécifiquement il s'agira de :

- 1) Quantifier la contrainte hydrique du sol ressentie par l'arbre, via le potentiel hydrique foliaire de base.
- 2) Quantifier la transpiration et sa dynamique en saison sèche à partir des mesures de flux de sève brute dans le tronc d'un échantillon limité d'arbres, en prenant en compte les variabilités azimutale et radiale de la densité de flux.
- 3) Analyser l'effet de la demande évaporative et du taux de feuillaison en phase de défeuillaison.
- 4) Analyser l'effet de la dimension des individus sur la transpiration.

Le présent document est structuré en trois chapitres. Le premier présente une synthèse bibliographique sur *F. albida* et les méthodes utilisées pour estimer la transpiration. Le deuxième est consacré au matériel utilisé et à la méthodologie de l'étude. Puis, les résultats sont présentés et discutés dans le troisième et dernier chapitre. Le mémoire se termine par une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1. Présentation de *Faidherbia albida*

Faidherbia albida (Del.) A. Chev. (Syn. *Acacia albida*) est une légumineuse appartenant à la famille des Fabacées et la sous famille des Mimosacées. C'est une espèce à large distribution en Afrique, essentiellement en zone soudanienne et sahélienne (Fagg et Barnes, 1990). Elle est très proche de la tribu des Acacieae, avec néanmoins quelques différences comme la soudure basale des filets staminaux, le rythme phénologique foliaire inversé et l'anatomie du bois (Campa et al., 1996), qui en font un genre à part des acacias (Chevalier, 1928 ; CTFT, 1988).

La hauteur de *F. albida* atteint généralement 15 à 20 mètres à l'âge adulte. La hauteur du fût est en général comprise entre 3 et 4,5 m. Les vieux sujets forment une large cime hémisphérique, tandis que celle des jeunes est en pyramide inversée (CTFT, 1988). C'est une espèce caducifoliée à croissance indéfinie durant la phase de feuillaison (Photo 1).

Les feuilles

Les feuilles sont composées, alternes et caractéristiques des Mimosoideae avec des pétioles dépourvus de glande. Ces folioles sont glabres à pubescentes, de couleur vert bleuté, oblongues (Vandenbeldt et al., 1992).

Les épines

Les épines sont insérées par paires à la base des feuilles. Elles sont droites et fortes, épaissies à la base, souvent à extrémité orange ou brune. Leur épaisseur au niveau du support permet la distinction avec les acacias à longues épines (CTFT, 1988).

Les fleurs

Les inflorescences sont en épis axillaires denses avec un pédoncule et apparaissent deux mois environ après la feuillaison (Wood, 1989).

Les fleurs sessiles ou avec un pédicelle sont d'abord blanches, crèmes puis jaunes et sont très odorantes. La floraison débute vers la septième année (CTFT, 1988).

Le fruit

Le fruit est une gousse indéhiscente de couleur orange vif à brun orange qui tombe à terre environ trois mois après la floraison (CTFT, 1988). Sa surface, convexe d'un côté, devient

concave de l'autre et le mésocarpe charnu à l'état frais s'enroule plus ou moins en spirale en se lignifiant, comme des pelures de pommes séchées (Dembele, 1994).

1.1. Répartition géographique

Les peuplements de *Faidherbia albida* les plus importants en Afrique se rencontrent dans les pays suivants : Sénégal, Gambie, Mali, Burkina Faso, Tchad, Egypte, Soudan (Dembele, 1994). On en trouve aussi en Moyen Orient jusqu'en Inde.

En Afrique de l'Ouest, on peut considérer *F. albida* comme une espèce soudanienne trouvant son maximum d'expansion entre les pluviométries annuelles de 500 à 800 mm (CTFT, 1988). Elle reste néanmoins toujours exigeante en eau. C'est une espèce phréatophyte. Son système racinaire avec pivot à croissance rapide lui permet une exploration étendue du substrat pour subvenir à ces besoins (Dupuy et Dreyfus, 1992).

1.2. Importance

Elle fournit du fourrage de grande qualité nutritionnelle aux troupeaux en période de soudure. En outre, les cultivateurs lui reconnaissent un effet améliorant du rendement de certaines cultures, en particulier céréalières. *F. albida* pourrait freiner l'érosion et la perte des éléments nutritifs et améliorer les propriétés physiques du sol : la fraction organique et la fertilité au sens large (Charreau et Vidal, 1965). Elle assure également la disponibilité de l'eau au profit de la culture associée grâce à différents processus écologiques tels que la redistribution hydrique (Bayala et al., 2008).

Sa phénologie soulève de nombreuses questions relatives à la stratégie d'utilisation de l'eau (Roupsard, 1997 ; Roupsard et al., 1998 ; Roupsard et al., 1999). Les informations concernant le fonctionnement hydrique de l'espèce sont rares mais il est probable qu'elle rencontre des contraintes hydriques sévères au stade jeune avant d'atteindre la nappe si elle n'est pas aidée par le pied mère (drageon dans ce cas) mais peu probable qu'elle rencontre des contraintes hydriques majeures au cours de la saison sèche à l'état adulte une fois qu'elle a atteint la nappe (Roupsard, 1997).



Photo 1: Illustrations botaniques de *F. albida* (Diouf, 2019).

a et **d** : rameaux fleuri, **b** : épines et **c** : rameaux feuillés

2. Bases physiques de la transpiration et du cycle de l'eau

2.1. Bilan hydrique du sol

La consommation d'eau d'une culture ou d'un peuplement ligneux peut être estimée par l'évapotranspiration en effectuant le bilan hydrique du sol (Eq.1). Cette méthode évalue les quantités d'eau qui entrent, sortent ou demeurent dans un volume spécifique de sol au cours

d'une durée donnée. Les différents termes du bilan hydrique sont reliés par l'équation suivante (Katerji et *al.*, 1984) :

$$P + I - \Delta Q - ETR - D \pm R = 0 \quad (1)$$

Avec ΔQ : la variation du stock d'eau dans le sol pour un intervalle de temps donné et pour une tranche de sol.

P, I et ETR représentent respectivement les pluies, l'irrigation et l'évapotranspiration réelle cumulée pour le même intervalle de temps.

D : le flux vertical d'eau exprimé ici positivement pour un drainage, négativement en cas de remontée d'eau.

$\pm R$: l'apport ou perte latérale d'eau par ruissellement superficiel.

2.2. Bilan d'énergie et conductance du couvert

La transpiration est le moteur de la circulation de la sève brute dans le xylème. Elle se traduit par l'émission de vapeur d'eau au niveau des feuilles. Au niveau de la feuille le bilan d'énergie (Eq.2) peut s'écrire sous la forme (Loustau et *al.*, 1991) :

$$R_n = H + \lambda E + S + M \quad (2)$$

R_n correspond au rayonnement net absorbé par la feuille, H est le flux de chaleur sensible, λE est le flux de chaleur latente de transpiration, S représente le stockage de chaleur dans la feuille et M l'absorption d'énergie liée aux réactions biochimiques dont la photosynthèse. Ce bilan fonctionne également au niveau de l'écosystème, dans ce cas les flux se rapportent à cette échelle.

Les flux ont différentes origines : les flux de chaleur proviennent de la transformation de l'énergie radiative disponible à la surface, les flux d'eau de l'évapotranspiration et les flux de carbone des dégagements et absorptions de CO₂ par les plantes ou les activités anthropiques (Granier et *al.*, 2000).

2.3. Equation de Penman-Monteith

La transpiration de la voûte est décrite par l'équation de Penman-Monteith (Monteith, 1965). Elle combine les variables météorologiques avec les conductances aérodynamique, g_a , et de surface, g_c , à donner :

$$E = (\varepsilon R/\lambda + Dga)/(\varepsilon + 1 + ga/gc) \quad (3)$$

où R est l'énergie disponible et D est le déficit de saturation de l'air (exprimé en termes de fractions molaires sans dimension) à une hauteur de référence au-dessus de la surface. Le coefficient ε dépend de la température et représente le taux de changement du contenu de chaleur latente de l'air saturé avec un changement de la chaleur sensible. λ est la chaleur latente de vaporisation. Si g_s est la conductance stomatique moyenne des feuilles d'un couvert végétal dont l'indice de surface foliaire est L, alors $g_c = g_s L$.

2.4. Evapotranspiration potentielle de référence ETo

L'évapotranspiration potentielle de référence (ETo) c'est-à-dire pour un gazon herbacé théorique irrigué à l'optimum (Allen et *al.*, 1998) est déterminée à partir de l'équation :

$$ET0 = \frac{0,408 \Delta (Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (4)$$

où ETo est l'évapotranspiration de référence (mm.jour⁻¹), Rn est le rayonnement net à la surface de la culture (MJ m⁻².jour⁻¹), G est la densité du flux thermique du sol (MJ m⁻².jour⁻¹), T est la température de l'air à 2 m de hauteur (°C), u₂ est la vitesse du vent à 2 m de hauteur (m.s⁻¹), e_s est la pression de vapeur saturante (kPa), e_a la pression de vapeur réelle (kPa), e_s-e_a le déficit de pression de vapeur saturante (kPa), Δ la courbe de pression de vapeur en pente (kPa.°C⁻¹) et γ la constante psychrométrique [kPa.°C⁻¹].

Jarvis (1975) décrit l'écoulement de l'eau le long du chemin ramifié comme la somme des débits partiels, du q_i et des résistances (=1/G_i où G_i est la conductance) reliés en série :

$$\Psi_1 = \Psi_r - \sum \left(\frac{q_i}{G_i} \right) - h \rho_w g \quad (5)$$

où Ψ_1 et Ψ_r sont les potentiels hydriques des feuilles et des racines et h ρ_w g est l'attraction gravitationnelle sur la colonne d'eau de la hauteur h et de la densité des arbres ρ_w .

2.5. Réponse aux principaux facteurs de l'environnement

Jarvis et Steward ont proposé une fonction de type multiplicatif pour relier la variation de la conductance des canopées aux facteurs environnementaux. Cette approche est maintenant largement utilisée. Le modèle suivant dérivé de Jarvis et Steward est proposé par Granier et *al.*, (2000) et est fonction des facteurs environnementaux :

$$Gc = Gc_{max}. f1(R, D). f2(LAI). f3(Is). f4(t) \quad (6)$$

où G_{cmax} ($m.s^{-1}$) est la G_c maximale, réduite par les fonctions suivantes f_i variant entre 0 et 1 de : à la fois le rayonnement global (R) et le déficit de pression de vapeur d'air (D) mesuré au-dessus du peuplement ; l'indice de surface foliaire (LAI) ; une variable quantifiant l'intensité du stress hydrique (I_s) ; la température de l'air (t).

2.6. Relation avec flux de sève et potentiel hydrique foliaire

La conductivité stomatique est définie comme le débit par gradient de pression. Elle est fonction de la transpiration de l'arbre, de la conductance stomatique moyenne, de la surface foliaire et du VPD.

$$k_s * A_s = g_s * D * A_l * l / \Delta \Psi \quad (7)$$

Avec A_l la surface foliaire, g_s la conductance stomatique, D le déficit de pression de vapeur feuille-air (en fraction molaire), $\Delta \Psi$ la différence de potentiel entre la racine et la feuille et A_s la surface de la section transversale de l'aubier.

3. Méthodes d'estimation de la transpiration

La mesure de la transpiration constitue un élément essentiel à la compréhension de la physiologie de l'arbre et de la dynamique des transferts d'eau dans les peuplements ligneux (Granier, 1985). Il existe différentes méthodes d'estimation de la transpiration parmi lesquelles on peut citer :

3.1. Via les échanges gazeux

3.1.1. Méthode des écoulements turbulents

Cette technique met en relation la composante verticale de la vitesse du vent et des fluctuations de température, de CO_2 et d' H_2O . Un système de mesure des covariances de turbulence est constitué d'un anémomètre sonique tridimensionnel, d'un analyseur de gaz par infrarouge et d'un ordinateur. Ce dernier comprend un programme d'acquisition, d'analyse et de traitement des données. L'anémomètre est placé au sommet d'une tour (Coppin et Taylor, 1973). Il permet de mesurer les composantes de la vitesse du vent en trois dimensions. Les concentrations en CO_2 et H_2O de l'air sont mesurées par l'analyseur de gaz par infrarouge (Aubinet et al., 2001). Les données brutes sont ensuite traitées par des logiciels comme EDISOL (Moncrieff et Massheder, 1997). Les densités de flux de CO_2 de chaleur sensible et de chaleur latente sont ainsi calculées toutes les demi-heures. Cette méthode des corrélations turbulentes, éprouvée grâce aux bilans d'énergie, permet de mesurer le flux de vapeur d'eau, c'est-à-dire en pratique

l'évapotranspiration (somme des flux d'évaporation du sol et du sous-couvert et du flux de transpiration des arbres) de l'écosystème. Les autres grandeurs mesurées sont : le rayonnement, la précipitation, l'humidité de l'air, la température de l'air et la pression atmosphérique.

3.1.2. Chambre d'assimilation et de transpiration

Cette méthode est utilisée pour des surfaces végétales de quelques mètres carrés soumises au rayonnement solaire naturel et qui se rattachent toutes plus ou moins à deux principes :

Les enceintes en circuit fermé ou semi-fermé

L'air de l'enceinte n'est pas renouvelé. L'assimilation nette et la transpiration sont mesurées par la vitesse d'appauvrissement de l'air en gaz carbonique et l'augmentation de sa teneur en eau (Garrity et *al.*, 1984). Comme il n'y a pas de surpression par rapport à la pression atmosphérique ambiante, il y a possibilité de contamination par l'air extérieur ; un soin particulier doit donc être accordé à l'étanchéité de l'enceinte et des circuits annexes (Daley et *al.*, 1984). Ces systèmes sont réservés à des mesures ponctuelles et ne dépassant pas 1 à 2 minutes (Peters et *al.*, 1974).

Les enceintes en circuit ouvert

Pour les enceintes en circuit ouvert, l'air extérieur est insufflé dans l'enceinte qui se trouve ainsi en légère surpression. Il n'y a donc pas de risque de contamination et l'air ressort avec des caractéristiques comme la température, les concentrations en CO₂ et H₂O différentes de l'air d'entrée (Balding et *al.*, 1973).

Le calcul de la transpiration suppose que l'on connaisse simultanément le débit général d'air qui traverse l'enceinte et l'écart de concentration en vapeur d'eau entre l'entrée et la sortie (Balding et *al.*, 1973).

3.2. Via le flux de sève xylémienne

L'estimation de la transpiration est souvent faite par des mesures indirectes qui se basent soit sur un marqueur isotopique, soit sur une trace thermique dans ou autour du flux de sève brute (appelée aujourd'hui méthode thermique). Les mesures du flux de sève de xylème basées sur la conduction et la convection de la chaleur dans la zone de conduction de la sève brute sont maintenant largement utilisées pour étudier les relations hydriques chez les plantes et en particulier chez les espèces ligneuses (Do, 2011). La quantification du flux de sève brute constitue une estimation de la transpiration foliaire, dans des conditions où l'on peut négliger

les variations de réserve hydrique du végétal entre le point de mesure et la surface évaporante des feuilles. En pratique, flux de sève brute et transpiration peuvent être considérés égaux à l'échelle de 24 heures, compte-tenu du décalage temporel qui les affecte à un pas de temps plus fin, lié aux phénomènes de stockage et déstockage de l'eau dans les tissus.

Plusieurs synthèses ont été consacrées aux méthodes thermiques de mesure du flux de sève (Vandegehuchte et Steppe, 2013 ; Flo et *al.*, 2019b). On distingue principalement trois grandes familles de méthodes suivant le principe de mesure : par transmission de chaleur, par bilan thermique et par dissipation de chaleur.

3.2.1. Transmission de chaleur

Principe

Elles sont souvent appelées méthodes par impulsions de chaleur. La vitesse de déplacement d'une impulsion de chaleur est déterminée à l'aide d'un dispositif composé d'une résistance chauffante pouvant émettre une brève impulsion de chaleur et d'au minimum deux capteurs de températures à proximité. On mesure le temps que met l'impulsion de chaleur pour parvenir à un point situé à une distance connue (Huber et *al.*, 1937). Pour convertir la vitesse d'impulsion en flux total de sève, il faut connaître la surface de la tranche conductrice du xylème et les propriétés thermiques du milieu.

La méthode présente l'avantage d'être déterministe (basée sur des équations physiques) et d'être adaptée aux gros diamètres. Les principaux inconvénients sont : le caractère ponctuel de la mesure dans le tronc, la sensibilité de la mesure aux erreurs de parallélisme, la complexité, la fragilité et le coût des capteurs multi-aiguilles.

3.2.2. Bilan de chaleur

Principe

Un manchon chauffant qui délivre une puissance calorifique constante W , est disposé autour d'un tronc ou d'une tige. Il contribue à élever la température. Il en résulte, au niveau des surfaces externes des flux de chaleurs. Sous réserve qu'il n'y ait pas d'évaporation ou de condensation d'eau, le principe de conservation de l'énergie permet d'exprimer le bilan énergétique suivant :

$$W = Q_{av} - Q_{am} + Q_{lat} + Q_{sève} + Q \quad (8)$$

Avec Q_{am} et Q_{av} : le flux de chaleur par conduction selon l'axe du bois, respectivement vers l'amont et vers l'aval,

Q_{lat} : le flux de chaleur par conduction/convection vers l'air environnant,

$Q_{sève}$: le flux de chaleur par convection associée au débit de sève et d'une augmentation d'énergie calorifique stockée par unité de temps.

Avec Q , la puissance calorifique mobilisée par le réchauffement de l'élément de volume V .

La chaleur W fournie à l'élément de volume V doit se retrouver dans ces flux de chaleur et, éventuellement contribuer à faire varier la température de l'élément de volume.

Par ailleurs le flux de chaleur Q_s (W) est proportionnel au débit de sève ds ($m^3.s^{-1}$) et à l'échauffement de la sève ST ($^{\circ}C$) lors de la traversée du segment chauffé (Eq.9).

$$Q_s = C * ds * dT \quad (9)$$

Avec C_{eau} , chaleur volumique de la sève brute.

La combinaison des équations (8) et (9) permet d'obtenir le débit de sève :

$$ds = \frac{(W - Q_{av} + Q_{am} - Q_{lat})}{C.dT} \quad (10)$$

Ainsi, le débit de sève brute $Q_{sève}$ peut être calculé si on mesure les différents flux de chaleur (Q_{av} , Q_{am} , Q_{lat}) et le réchauffement dT de la sève (Valancogne et Granier, 1991).

Cette méthode permet de déterminer les flux de chaleur conductifs dans l'axe du tronc et l'échauffement de la sève. On admet que les pertes de chaleur latérales sont rendues négligeables par l'utilisation d'un manchon fortement isolant (Ozier, 1993). Parmi les méthodes thermiques développées pour évaluer la transpiration des végétaux, la méthode de bilan de chaleur offre l'avantage de mesurer directement le débit de sève sans nécessiter la détermination d'une surface conductrice. Elle est donc absolue et ne nécessite qu'une calibration partielle (condition à flux nul) de calibration. Toutefois elle ne s'applique qu'à des organes de petit diamètre (jusqu'à environ 20 cm en pratique) et consomme beaucoup d'énergie avec un risque de brûlure et de mortalité sur le long terme.

3.2.3. Dissipation de chaleur

3.2.3.1. Dissipation thermique continue (méthode de Granier : CTD)

Principe

Le principe repose sur le refroidissement d'une sonde chauffée à puissance constante engendré par la circulation de la sève (convection). Le capteur est constitué de deux aiguilles contenant chacun un thermocouple cuivre-constantan (thermal dissipative probes ou TDP) : une aiguille chauffée et une aiguille non chauffée afin de suivre la température de référence du bois (Granier, 1985). Les deux sondes sont insérées dans le bois d'aubier du tronc ou de la branche par une mèche et sont séparées verticalement de 10 cm afin d'éviter une interférence thermique (Lu et al., 2004). Les deux thermocouples sont montés en opposition, et on mesure l'écart de température entre les deux sondes (Granier et Gross, 1987).

La décroissance de l'écart de température est reliée à la densité de flux selon une formule empirique (Eq.11), validée au laboratoire sur plusieurs espèces et des matériaux poreux synthétiques (Granier, 1987).

$$J_u = 4,284 \left(\frac{dT_0 - dT_u}{dT_u} \right)^{1,231} \quad (11)$$

Avec J_u , la densité de flux de sève (en $l \cdot dm^{-2} \cdot h^{-1}$) ; dT_0 , l'écart de température maximale à flux nul et dT_u , l'écart de température en présence de flux. Le flux de sève total traversant l'organe conducteur est alors estimé par la relation :

$$F_u = J_u * S_a \quad (12)$$

Avec S_a , la surface conductrice totale exprimée en dm^2 .

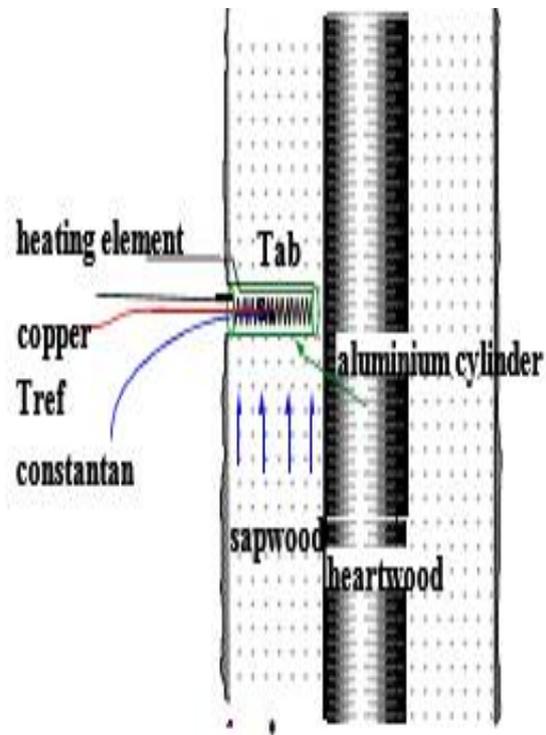
Cette méthode est simple et peu coûteuse. Cependant le chauffage permanent engendre une certaine consommation d'énergie et un stockage parasite de chaleur. D'autre part, le système à double aiguille est sensible aux gradients thermiques naturels verticaux. C'est pourquoi nous avons choisi la méthode de dissipation thermique transitoire décrite ci-dessous.

3.2.3.2. Dissipation thermique transitoire

Principe

La méthode TTD utilise des sondes de type Granier mais avec un programme cyclique de chauffage. La durée de chauffage principalement utilisée est de 10 minutes (Do et Rocheteau,

2002 ; Do et *al.*, 2011). La méthode peut s'appliquer à une aiguille unique (Fig.1), la température de référence est alors obtenue par interpolation des températures avant chauffage.



***Heating element** : élément de chauffage, **copper constantan** : cuivre constantan, **Tref** : température de référence, **sapwood** : aubier, **heartwood** : bois de cœur, **aluminium cylinder** : cylindre en aluminium, **Tab** : température absolue.

Figure 1 : Système TTD avec une sonde unique de type Granier (Do et *al.*, 2018).

À la différence de la méthode originelle de Granier, il n'y a qu'une sonde (qui joue le rôle à la fois de sonde chauffée et de référence) et le chauffage n'est pas continu mais intermittent. Le flux réduit l'élévation de la température de la sonde en accroissant la dissipation de chaleur dans le sens du débit de sève. Sur un chauffage de 10 mn la courbe en marron (Fig.2) représente l'élévation maximale de température à flux nul. La courbe en bleu indique l'élévation de la température dans les conditions de flux élevé.

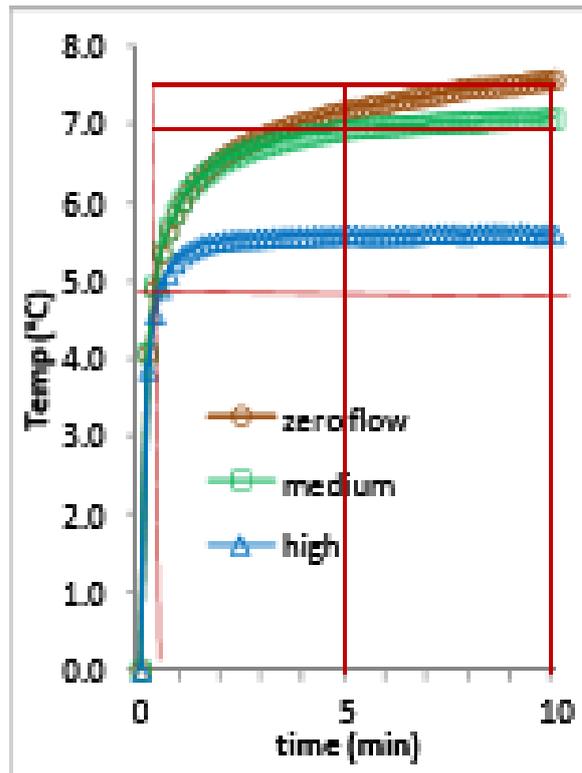


Figure 2 : Elevation de la température avec le système TTD (Do et *al.*, 2018), au cours des 10 min après le chauffage de la sonde unique, et selon 3 niveaux de débit de sève.

La décroissance de l'écart de température est reliée à la densité de flux par une calibration empirique (Eq.13) :

$$J = a * K \quad (13)$$

Avec J : la densité de flux de sève exprimée en $\text{l.dm}^{-2}.\text{h}^{-1}$; a, le coefficient de calibration linéaire et K, le terme sans dimension appelé index thermique obtenu à partir de la formule suivante :

$$K = \left(\frac{T_m - T_u}{T_u} \right) \quad (14)$$

Où T_m représente l'élevation maximale de température obtenue à flux nul et T_u l'élevation de température dans les conditions de flux.

Isarangkool Na Ayutthaya et *al.* (2010) ont établi une calibration linéaire plurispécifique avec $a=12,95$ et $R^2=0,88$, incluant les espèces suivantes : *Hevea brasiliensis* (hévéa), *Mangifera indica* (manguier) et *Citrus paradisi* (pomelo).

4. Transpiration des ligneux et agroforesterie en Afrique de l'Ouest

Les espèces ligneuses font parties intégrantes des systèmes de production agricole (Barmo et *al.*, 2019). La quantification de la transpiration de ces espèces est d'une importance majeure pour les sciences hydrologiques, écologiques et agricoles (Wei et *al.*, 2017). Cependant les données de transpiration des espèces agroforestières en Afrique de l'Ouest sont rares et la plupart des études ont été de courte durée.

Les rares études sur la transpiration des espèces ligneuses en Afrique de l'Ouest ont porté sur *Eucalyptus grandis*, *Vitellaria paradoxa*, *Acacia raddiana* et *Faidherbia albida* (Dye, 1996 ; Rousard et *al.*, 1999 ; Do et *al.*, 2008 ; Awessou et *al.*, 2017). Bazié et *al.* (2018) ont trouvé chez *V. paradoxa* une consommation maximale d'eau de 151 l chez un individu ayant un diamètre de 50 cm environ. Chez *F. albida*, Rousard et *al.* (1999) ont trouvé selon les arbres et les saisons des maxima journaliers de densité de flux variant entre 1 et 3,5 l/dm²/h. Les études de Rousard et *al.* (1999) et d'Awessou et *al.* (2017) sur respectivement *F. albida* et *V. paradoxa* ont prouvé une forte décroissance radiale centripète de la densité de flux de sève. Le rapport J/J_i où J représente la densité de flux externe et J_i la densité de flux mesurée à une profondeur i donnée diminue de la périphérie au centre de l'aubier avec des valeurs maximales enregistrées à la périphérie. Sur un autre registre Alvarado et *al.* (2015) ont montré que le déficit de pression de vapeur (VPD) est le facteur le plus important dans le contrôle du flux de sève chez certaines espèces. Do et *al.* (2011) ont montré sur *A. raddiana*, une forte corrélation entre la phénologie foliaire et la transpiration avec un coefficient de détermination de 0,9.

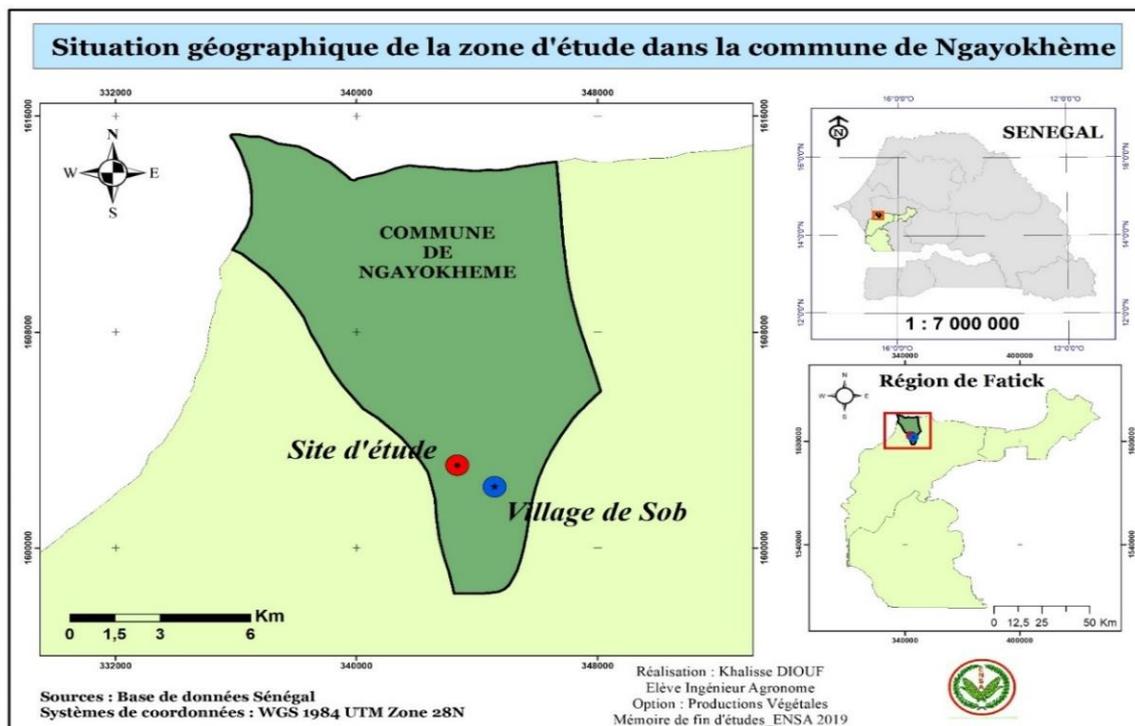
Une corrélation significative entre le flux total et le diamètre et entre la densité de flux et le diamètre est obtenue par Tsuruta et *al.* (2019) avec une valeur de référence du flux sur le cyprès japonais (*Chamaecyparis obtusa*).

Chapitre II : Matériel et méthodes

1. Zone et site d'étude

1.1. Situation géographique de la zone de l'étude

Le site instrumenté « Faidherbia-Flux » se trouve à 1,4 km du village de Sob. Il se situe dans la commune de Ngayokhème (carte 1) dans l'arrondissement de Niakhar, dans le département de Fatick. Ce village sérère fait partie du bassin arachidier. Il s'étend sur 15 km de long et 15 km de large.



Carte 1: Situation géographique de la zone d'étude.

1.2. Climat

Cette zone est soumise au climat sahélo-soudanien continental avec deux saisons contrastées : une saison sèche (d'octobre à début juin) et une saison des pluies qui s'étale sur une période de 3 à 4 mois (mi-juin et fin septembre) (Lericollais, 1969 ; Lalou, 2015). Il y tombe en moyenne entre 400 et 800 mm de pluie, avec de grandes tendances depuis les années 1960, décrites par Lalou et *al.* (2019). Les précipitations sont marquées par une forte variabilité spatio-temporelle (Boulier et Jouve, 1990).

1.5. Flore et matériel végétal

L'espèce ligneuse dominante dans cette zone est *F. albida* (photo 2 et 3). La présence de cette espèce est due en partie aux paysans et à leurs troupeaux sédentaires. On y rencontre également d'autres espèces telles que le baobab (*Adansonia digitata*), le jujubier (*Abyssinica mauritiana*) et parfois le tamarinier (*Tamarindus indica*) (Lericollais, 1972). Les principales cultures rencontrées dans cette zone sont : le mil (*Pennisetum glaucum*), le sorgho (*Sorghum bicolor*), l'arachide (*Arachis hypogaea*), la pastèque (*Citrillus vulgaris*). Le tapis herbacé est composé principalement de *Cenchrus biflorus*, *Aristida stipoides*, *Aristida longiflora*, *Andropogon gayanus*, etc.



Photo 2: Site d'étude avec la tour à flux

Photo 3: Un exemple d'arbre suivi

Le matériel végétal sur lequel nous avons travaillé est *F. albida*. Pour le suivi en continu, cinq arbres ont été sélectionnés à proximité de la tour pour des raisons logistiques. Deux couples d'arbres ont été retenus pour économiser le nombre de centrales automatiques et de multiplexeurs, plus un arbre isolé. Les arbres ont été choisis afin de représenter un gradient de taille (les diamètres des arbres se situent entre 31 et 66 cm) et couvrir au maximum la gamme des circonférences de tronc observée dans le peuplement. L'étude présente se limite à la phase de défeuillaison qui s'étend de début avril jusqu'en fin juillet 2019, mais l'expérimentation est poursuivie depuis.

2. Méthodes

Des aiguilles uniques de type Granier avec un diamètre de 2 mm et une extrémité sensible de 20 mm de long (UP Germany) ont été installées sur les cinq individus échantillonnés. Elles sont insérées dans le xylème du tronc selon différents azimuts (TA) et un profil radial (TR), exemple en photo 4 et Fig.3. Par individu, le nombre de fluxmètres azimutaux dans le xylème externe autour du tronc varie de 4 à 6 selon la circonférence (photo 4), ces capteurs sont distincts de 90° par exemple dans la Fig.3 les uns des autres. Ils sont tous placés à 1,5 m au-dessus du sol. Les fluxmètres azimutaux (TA) mesurent la densité de flux dans la zone la plus externe du xylème. Pour l'orientation des fluxmètres azimutaux, le TA1 commence toujours au Nord et ensuite la numérotation se poursuit dans le sens des aiguilles d'une montre (disque de tronc vu d'en haut). Ils sont complétés par une exploration radiale pour déterminer le profil radial de la densité de flux de sève (Fig.3). Les capteurs radiaux (de 2 cm de long également) sont centrés sur des anneaux conducteurs successifs de 3 cm de profondeur (0-3, 3-6, 6-9, 9-12 cm). Pour chaque arbre, l'ensemble des capteurs est protégé du rayonnement direct et de la pluie par un déflecteur.

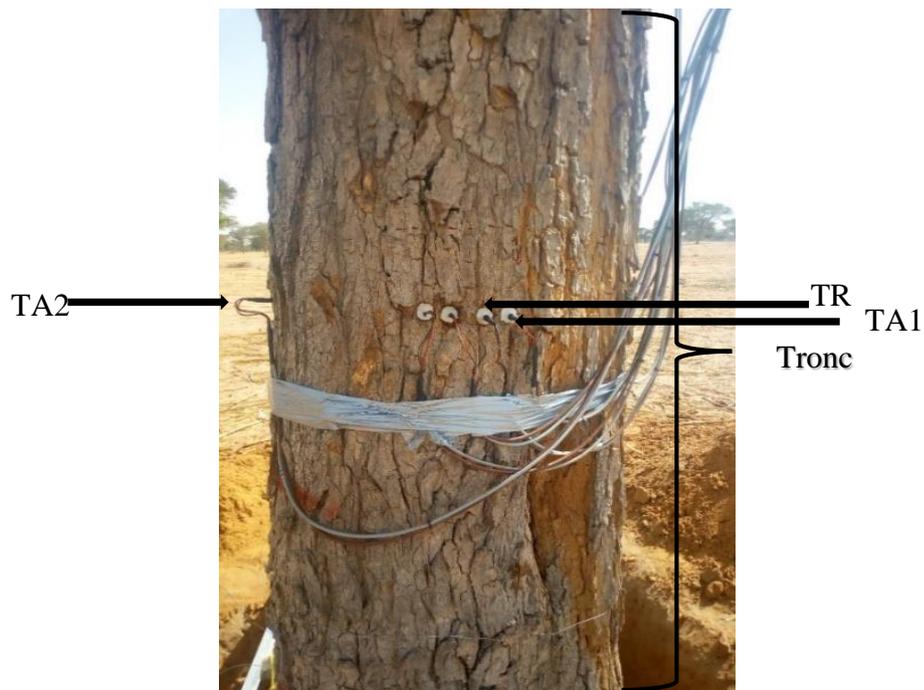


Photo 4: Tronc de l'arbre 1a équipé de fluxmètres, vu du côté Nord avec le capteur TA1 et le profil radial au premier plan.

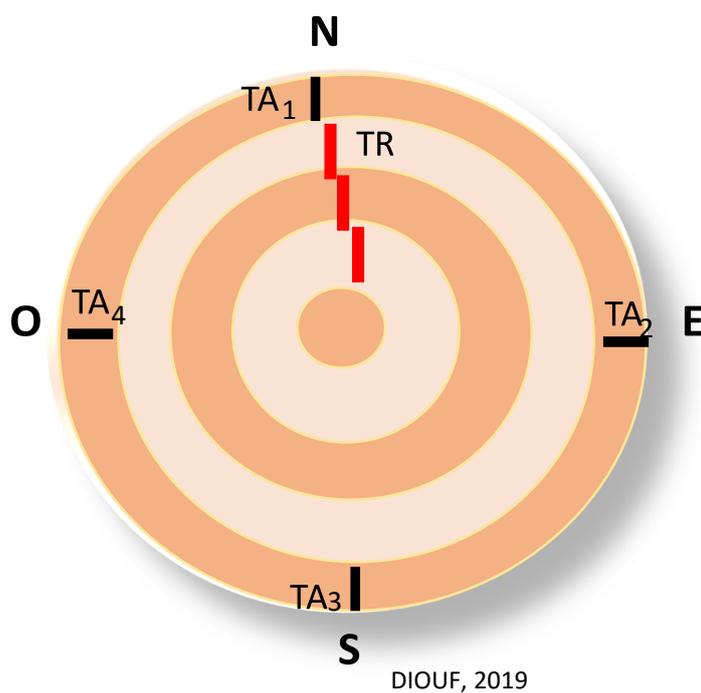


Figure 3 : Dispositif d'insertion des fluxmètres sur une section transversale de la tige (disque) vue d'en haut.

*N : Nord, E : Est, S : Sud, O : Ouest, TA : Tronc Azimutal et TR : Tronc Radial.

L'enregistrement des signaux de ces capteurs est assuré par une centrale d'acquisition de données CR1000 avec un multiplexeur AM16/32B (Campbell Scientific) (photo 5). Le principe consiste à faire un chauffage intermittent de 10 mn suivi d'une coupure de 20 mn ce qui permet de faire une mesure toutes les 30 mn. Les données sont recueillies tous les mois à l'aide d'un ordinateur.

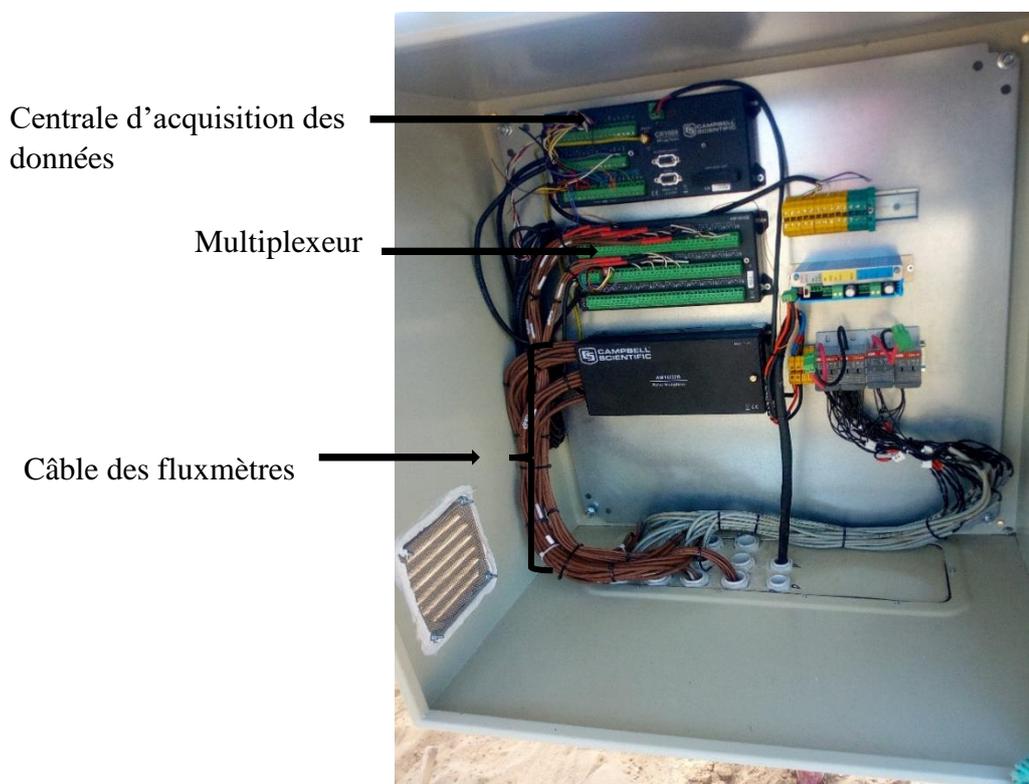


Photo 5: Système automatique d'alimentation électrique, commande des capteurs et acquisition des données.

2.1. Détermination de la surface conductrice

Les mesures de circonférence et d'épaisseur des écorces avant l'insertion des fluxmètres nous ont permis d'avoir le rayon total du xylème (R_{total}) par :

$$R_{total} = \text{Rayon externe} - \text{épaisseur d'écorce} \quad (15)$$

L'hétérogénéité de l'épaisseur de l'écorce entre les arbres et entre tous les points de prélèvement par arbre impacte la qualité de la relation entre épaisseur d'écorce et dimension extérieure du tronc (circonférence, diamètre ou rayon total, $R^2 = 40-50\%$) pour l'échantillon de cinq individus. Pour les profils radiaux, la segmentation par tranches externes de 30 mm a permis de

calculer la surface individuelle des anneaux correspondant au profil des quatre fluxmètres (tableau 1).

Tableau 1: Tableau récapitulatif de calcul de surface conductrice des anneaux.

Variables dendrométriques des individus échantillonnés				Décroissance des rayons totaux de bois intégrant les anneaux externes de 30 mm					Surface individuelle des anneaux (dm ²)			
N ^o Arbre suivi	Circonférence (mm)	R total	Epaisseur moyenne de l'écorce (mm)	R1	R2	R3	R4	Rcœur	S1	S2	S3	S4
5_1a	1258	200,2	14,5	185,7	155,7	125,7	95,7	65,7	3,2	2,6	2,1	1,5
4_1b	1502	239	20,1	218,9	188,9	158,9	128,9	98,9	3,8	3,3	2,7	2,1
27_2a	1778	283	18,6	264,3	234,3	204,3	174,3	144,3	4,7	4,1	3,6	3
28_2b	2096	156	16,6	139,3	109,3	79,3	49,3	19,3	2,3	1,8	1,2	0,6
46_4	980	156	16,6	139,3	109,3	79,3	49,3	19,3	2,3	1,8	1,2	0,6

*R_i représente le rayon total de bois jusqu'à l'anneau i.

*Si les surfaces individuelles des anneaux correspondant aux différents fluxmètres.

La surface conductrice des anneaux est obtenue par l'expression (Eq.16) :

$$S = \pi * (R_{ext}^2 - R_{int}^2) \quad (16)$$

Avec R_{ext}, le rayon extérieur de l'anneau considéré (sans écorce) et R_{int} le rayon interne de l'anneau considéré.

2.2. Estimation de la transpiration

Les flux de sève mesurés sont exprimés en densité de flux horaire (l.dm⁻².h⁻¹) ; cette expression de flux est obtenue à partir de l'index thermique K. La modalité de calcul avec un profil radial moyen individuel est utilisée pour estimer la transpiration de notre échantillon. L'intégration de la moyenne du cumul journalier de la densité de flux de sève externe et du profil radial sur la surface conductrice de l'anneau fournit la transpiration à l'échelle de l'anneau. La somme de ces flux correspond à la transpiration de l'arbre en l/jour. L'estimation de la transpiration (en

mm/jour) a été calculée avec une densité de 6,8 arbres/ha, observée sur 15 ha (Roupsard et *al.*, 2020).

2.2.1. Profil radial

Le profil radial de la densité de flux par arbre est établi durant la période de flux élevé et sans anomalies communes aux cinq arbres suivis (11/04 au 26/05). Il est défini en fonction du rapport J/J_i où J représente la densité de flux mesurée dans l'anneau externe et J_i la densité de flux mesurée dans un anneau interne i .

2.2.2. Densité de flux moyenne

Le flux total Q (en l/jour) est estimé à partir de la densité de flux de l'anneau par la relation suivante :

$$Q = J * S \quad (17)$$

Avec S la surface conductrice de sève de l'anneau, exprimée en dm^2 et J la densité de flux à l'échelle journalière ($\text{l}/\text{dm}^2/\text{j}$).

2.3. Potentiel hydrique foliaire

Des mesures mensuelles de potentiel hydrique foliaire ont été réalisées à l'aide d'une chambre à pression de type Scholander sur des rameaux feuillés. La chambre à pression est une enceinte fermée permettant d'exercer une pression sur le rameau feuillé. Le rameau feuillé est mis dans un sachet étanche après avoir été coupé afin de minimiser les risques de déshydratation dus à un trop long délai entre la coupe et la mesure. La chambre est reliée à une bouteille d'azote comprimé (photo 6). Elle est également composée d'un cylindre permettant d'enfermer le fragment prélevé et de deux vannes qui permettent de contrôler le débit de gaz entrant et sortant de la chambre. Le manomètre indique l'évolution de la pression à l'intérieur de celle-ci. Le potentiel hydrique foliaire exprimé en MégaPascal (MPa) ou en bars est une grandeur négative.

Le potentiel hydrique foliaire de base est supposé représenter un équilibre entre l'état hydrique de *F. albida* et celui du sol dans la zone racinaire. Les mesures sont réalisées en fin de nuit, avant le lever du soleil entre 5h et 06h 30mn. Le potentiel minimum le plus négatif représente la contrainte hydrique interne maximale journalière qui résulte du bilan entre le taux de transpiration (force atmosphérique) et l'absorption (force de l'eau dans le sol). Il est mesuré en milieu de journée entre 12h et 13h 30mn, en supposant que la transpiration y est maximale. La mesure consiste à introduire le rameau fraîchement coupé à travers un joint d'étanchéité. Le

rameau feuillé doit dépasser quelques millimètres du bouchon afin de pouvoir observer la sortie de la sève au niveau des vaisseaux. On augmente progressivement la pression jusqu'à ce que la sève apparaisse au niveau de la section de xylème (un changement de couleur, brillance avant bullage). Pour chaque individu quatre mesures répétitives ont été effectuées sur des rameaux feuillés prélevés aux différents côtés (Est, Ouest, Nord et Sud) de l'arbre.

Suite à une suspicion de surestimation de la contrainte en juin et juillet, au mois d'août, deux méthodes de mesures ont été comparées pour tester le biais potentiel d'une déshydratation de la feuille entre le moment de la coupe et celui de la mesure : la méthode d'ensachage avec du coton imbibé et la méthode initiale sans coton imbibé.

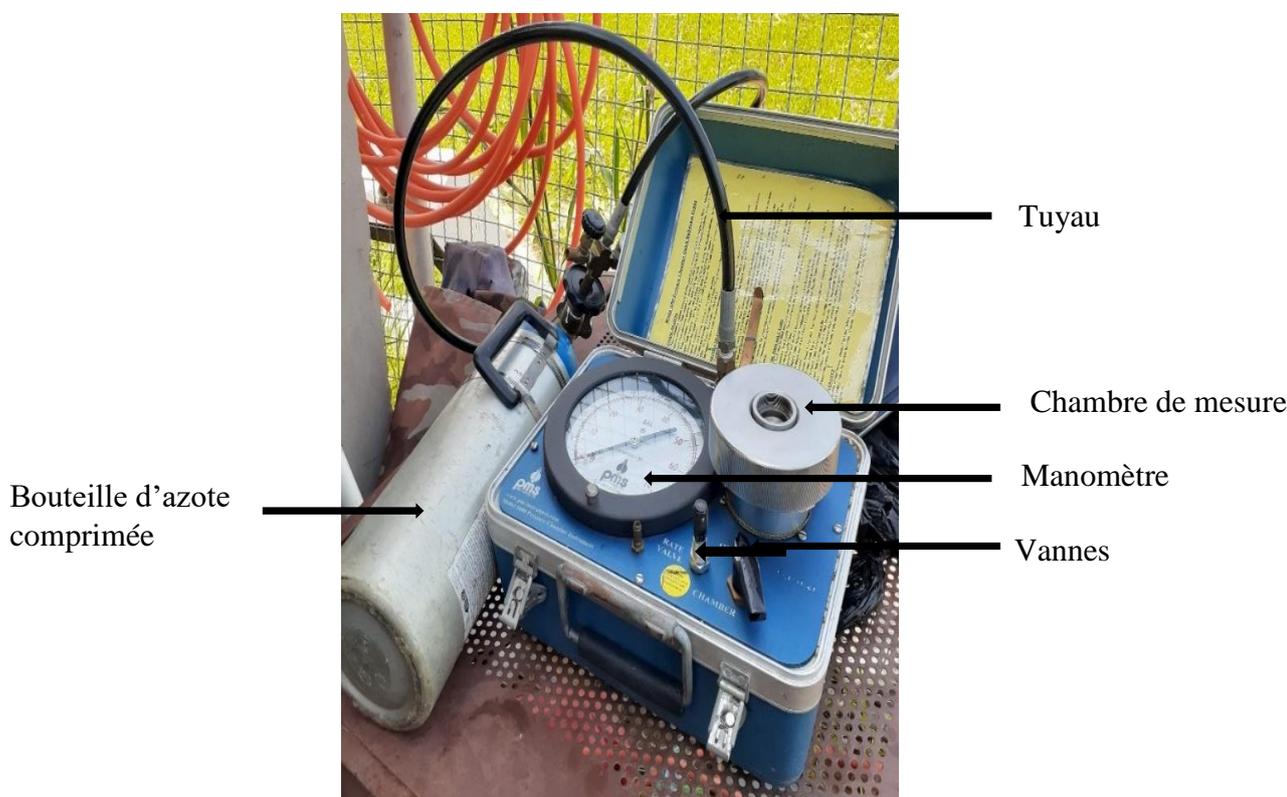


Photo 6: Chambre à pression de type Scholander.

2.4. Humidité du sol

L'humidité du sol est mesurée dans le puits 2 jusqu'à une profondeur de 1 m par la méthode Time Domain Reflectometry (TDR, photo 7). Le TDR mesure l'humidité par un principe électromagnétique. Ce dernier repose sur la relation entre la permittivité diélectrique relative des sols et la teneur en eau volumique. Les variations de la teneur en eau du sol affectent de façon prépondérante la permittivité diélectrique de celui-ci. La technique consiste à envoyer

une impulsion électromagnétique dans un guide d'ondes formé de deux électrodes métalliques insérées dans le sol à une profondeur donnée, et à analyser le temps de transit t (Laurent, 1998). Le dispositif est relié à une centrale d'acquisition des données CR1000 avec un multiplexeur AM16/32B (Campbell Scientific). Les mesures sont automatiques et enregistrées toutes les 30 mn. Les données sont recueillies tous les mois à l'aide d'un ordinateur. Le stock hydrique pour un horizon exprimé en mm (Eq.18) est obtenu à partir de l'expression suivante :

$$R = H_v * Z \quad (18)$$

Avec H_v , l'humidité volumique du sol en % et Z , la profondeur (cm).



Photo 7: Sondes TDR. Les sondes TDR sont insérées dans le puits 2 à différentes profondeurs.

2.5. Données climatiques et estimation de l'évapotranspiration

La température, l'humidité relative, la vitesse du vent, la pluviométrie et le rayonnement sont mesurés en continu par la tour à flux à 20 m et à 2 m de hauteur. L'enregistrement se fait toutes les 30 mn. Le déficit de pression de vapeur (VPD) et l'évapotranspiration potentielle de référence (ET_o) (Allen et *al.*, 1998) sont déduits à partir des paramètres climatiques mesurés.

2.6. Taux de feuillaison et circonférence des individus

L'observation phénologique du peuplement *F. albida* a été effectuée durant la période de l'étude. Le taux de feuillaison, en particulier a été décrit visuellement sur 12 individus. Seul deux arbres de notre échantillon faisait partie des 12 individus. La notation consistait à estimer pour chaque individu le pourcentage de branches du houppier portant des feuilles vertes. Le suivi a été effectué tous les 10 jours. Le taux de feuillaison du peuplement correspond à la moyenne des 12 individus. Les mesures de circonférence des individus ont été faites à l'aide d'un décimètre, sur un trait dessiné à une hauteur de 1,20 m. Elles sont effectuées avant l'insertion des fluxmètres et tous les mois.

2.7. Analyse des données

Les données analysées sont celles collectées entre le 14 avril 2019 (date où l'installation du dispositif de suivi des flux de sève a été bouclée pour les cinq individus sélectionnés) et le 30 juillet 2019 (date où est survenue une importante panne électrique qui a réduit les enregistrements à trois individus pendant plusieurs mois). Elles ont été traitées avec un tableur Excel version 2013. Les régressions linéaires, l'analyse de la variance et la comparaison multiple de moyennes ont été faites à l'aide du logiciel XLSTAT v4.1 (Addinsoft, 2019). Les jours correspondent aux répétitions pour le flux de sève, le taux de feuillaison mais pas pour les potentiels hydriques foliaires. La comparaison des moyennes du potentiel hydrique foliaire a été effectuée au seuil de 5% à l'aide du test de Tukey. La comparaison des moyennes et la modalité de l'anova de la variabilité azimutale, du profit radial et de la circonférence ont été effectuées au seuil de 5% à l'aide du test de Tukey.

Chapitre III : Résultats

1. Conditions climatiques et cycle phénologique

Comme pour les deux années précédentes, les précipitations ont marqué un retard. La première pluie est survenue le 30/06/19, une deuxième pluie isolée est intervenue un mois après, le 25/07/19 (Fig.4a). Les pluies ne sont devenues régulières qu'à partir de mi-août (17/08) et ceci jusqu'en fin septembre. Le cumul durant cette période a été de 237 mm. En décembre 2018, le profil hydrique est déjà très asséché sur 1 m de profondeur avec un stock de 22 mm, et il décroît encore progressivement jusqu'à la fin du mois de juin (Fig.4a). Après la première pluie, le stock hydrique a légèrement augmenté pour atteindre un pic en mi-septembre. Les valeurs maximales d'ETo (> 6 mm/j) sont obtenues en milieu de saison sèche, entre les mois de février et mai. Le taux maximal de feuillaison a été observé de janvier à février (Fig.4b). La chute des feuilles a commencé en mi-mars et a été complète en début août après les premières pluies. Comme mentionné dans la figure 4, notre période d'étude a concerné la phase de défeuillaison.

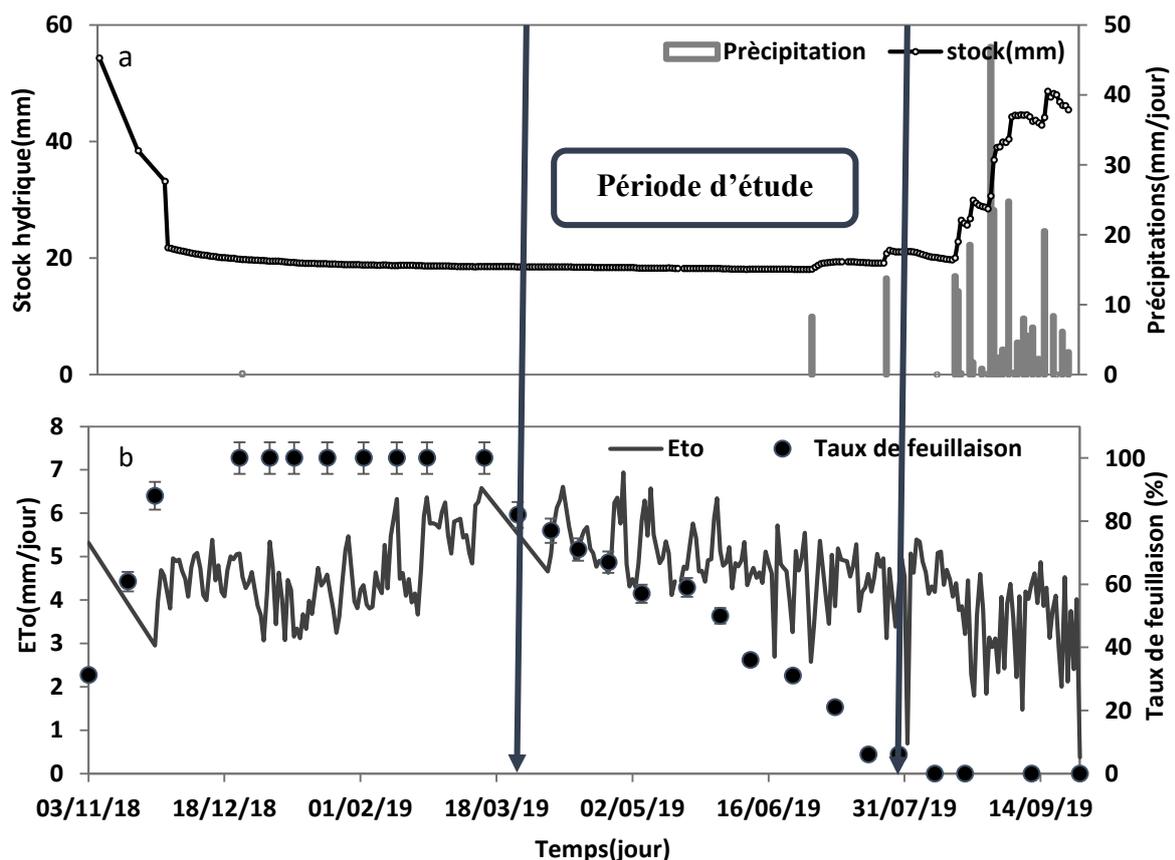


Figure 4 : Evolution saisonnière du stock hydrique du sol (jusqu'à une profondeur de 1 m), des précipitations, de l'ETo et du taux de feuillaison moyen du peuplement. Les flèches verticales délimitent la période d'étude.

a-évolution saisonnière du stock hydrique du sol jusqu'à une profondeur de 1 m et des précipitations. b-évolution saisonnière de l'ETo et du taux de feuillaison moyen du peuplement.

2. Potentiels hydriques foliaires

Le potentiel hydrique foliaire de base (Ψ_b) a augmenté entre juin et juillet (Fig.5). Il est passé de -0,89 à -0,43 MPa. Ce potentiel diminue légèrement au mois d'août. L'analyse de variance du potentiel hydrique foliaire de base montre des effets date, individu et interaction individu x date très significatifs ($P < 0,001$, tableau 2). Ces résultats décrivent une forte contrainte hydrique du sol en juin, plus marquée chez les individus 04 et 05, et qui se réduit remarquablement en juillet-août en période de forte défeuillaison après les premières pluies.

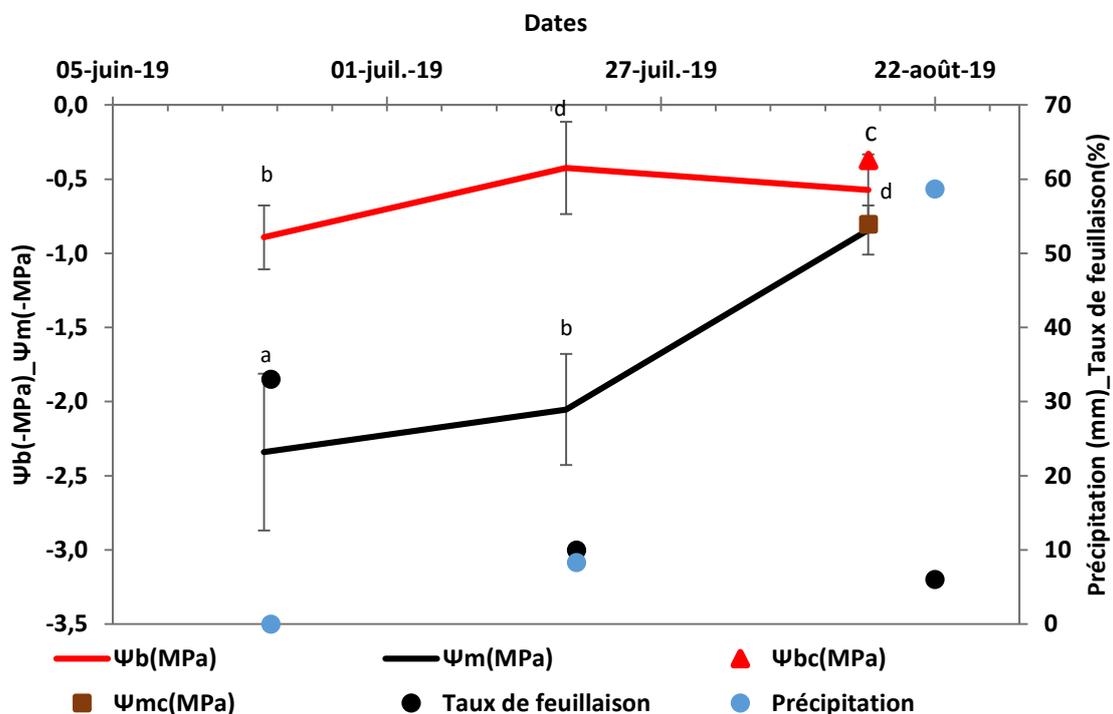


Figure 5 : Evolution saisonnière des potentiels hydriques foliaires de base et minimum. Les barres d'erreur correspondent aux écart-types.

Le potentiel minimum plus faible au mois de juin, a augmenté progressivement atteignant moins de -1 MPa au mois d'août. L'analyse de variance a montré pour le potentiel minimum des effets date, individu et interaction (date x individu) très significatifs ($P < 0,001$). Ces résultats décrivent une réduction du gradient de potentiel ($\Psi_b - \Psi_m$) qui apparait logique par rapport à la défeuillaison et sa conséquence sur la surface évaporatoire. Toutefois le VPD et l'ETo étaient aussi faibles le jour de mesure en août.

Le test comparatif de l'ensachage avec un coton humide (22/08) ne montre pas de différence pour Ψ_m (-0,80 contre -0,84 MPa), à l'inverse la différence est significative pour Ψ_b (-0,37 contre -0,57 MPa). Ce résultat suggère que le protocole initial sans coton humide engendrait pour le potentiel de base une déshydratation sensible de la feuille durant le transport de l'échantillon. Une lecture trop tardive (bullage) et/ou une montée en pression trop rapide peuvent avoir accentué la sous-estimation.

Tableau 2: Résultats d'analyse de variance des effets date, individu et interaction date x individu des potentiels hydriques foliaires.

Potentiels hydriques foliaires	Date	Arbre	Date x Arbre
Ψ_b	<0,001**	0,002**	0,00**
Ψ_m	<0,001**	0,002**	0,00**

Ψ_b : potentiel hydrique foliaire de base, Ψ_m : potentiel hydrique foliaire minimum, ** très significatif au seuil de 5%.

3. Densité de flux horaire

Les densités externes de flux dans les troncs présentent des allures similaires entre individus (Fig.6). Les courbes montrent un plateau maximal entre 10h et 15h, qui nous confirment que la mesure du potentiel hydrique minimum vers 12 heures s'effectue bien au moment de la transpiration maximale. Les maximums varient fortement entre individus. Les individus 05, 27 et 28 de circonférences plus importantes présentent les plus fortes densités de flux avec des maximums de 2,7 et 2,14 l/dm²/h, respectivement. Le minimum de flux de sève est observé entre 04h et 06h. L'analyse de variance de la densité de flux montre un effet individu significatif (p-value<0,05). Le VPD atteint une valeur particulièrement élevée de 6,70 kPa vers 17h. Les variations de VPD ne suivent pas les variations de densité de flux externe. *F. albida* est capable de réguler sa transpiration en ouvrant ou fermant ses stomates.

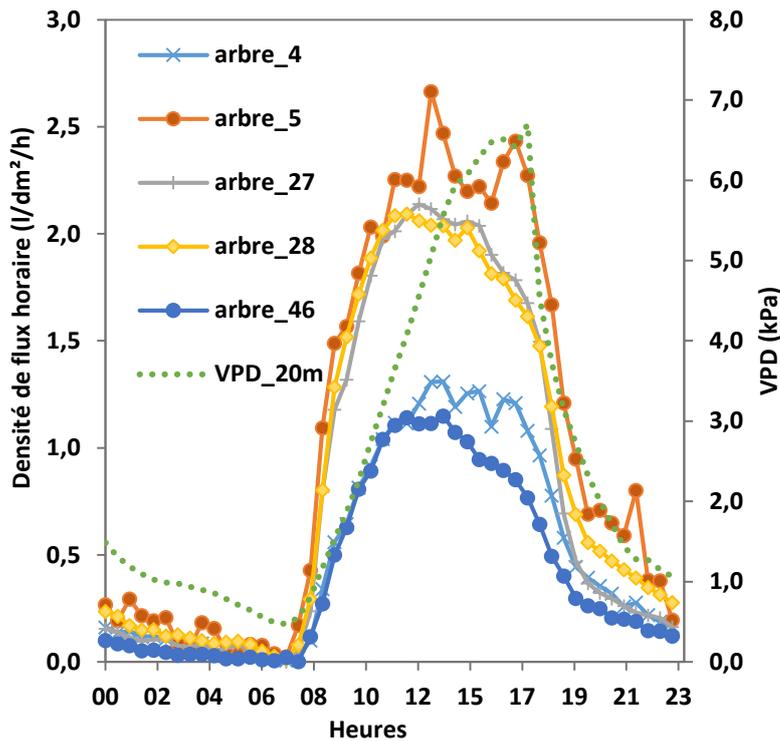


Figure 6 : Cinétiques horaires de la densité externe de flux et du VPD du 14/04/19 pour les cinq individus.

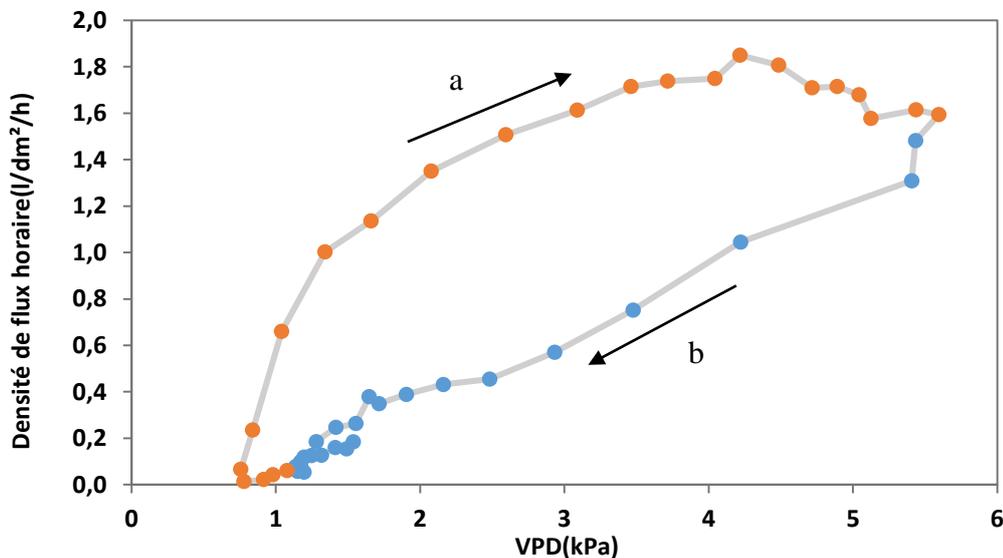


Figure 7 : Hystérésis de la relation entre la densité de flux et le VPD du 14/04/19.

a-le matin (6h-17h), **b**-début de nuit (18h-05h).

Pour les cinq individus le coefficient de variation moyen de la densité de flux entre les azimuts du tronc est de 43% ce jour-là. A l'échelle horaire la densité de flux n'est pas reliée au VPD. La différence de relation (hystèrese) entre le matin et l'après-midi, due à l'influence des

réserves hydriques de l'arbre, est particulièrement marquée (Fig.7). Les réserves contribuent à la transpiration le matin et se reconstituent en fin d'après-midi, le soir et la nuit.

4. Variabilité azimutale de la densité de flux

Les dynamiques sont remarquablement similaires entre les azimuts de l'individu 46 mais les intensités sont différentes (Fig.8). Le maximum de densité de flux horaire est obtenu au niveau de TA_Sud-Est et atteint 1,49 l/dm²/h. Ce fluxmètre est inséré au Sud-Est du tronc correspondant à la zone du houppier la plus exposée au soleil, la demande évaporative est possiblement la plus importante de ce côté.

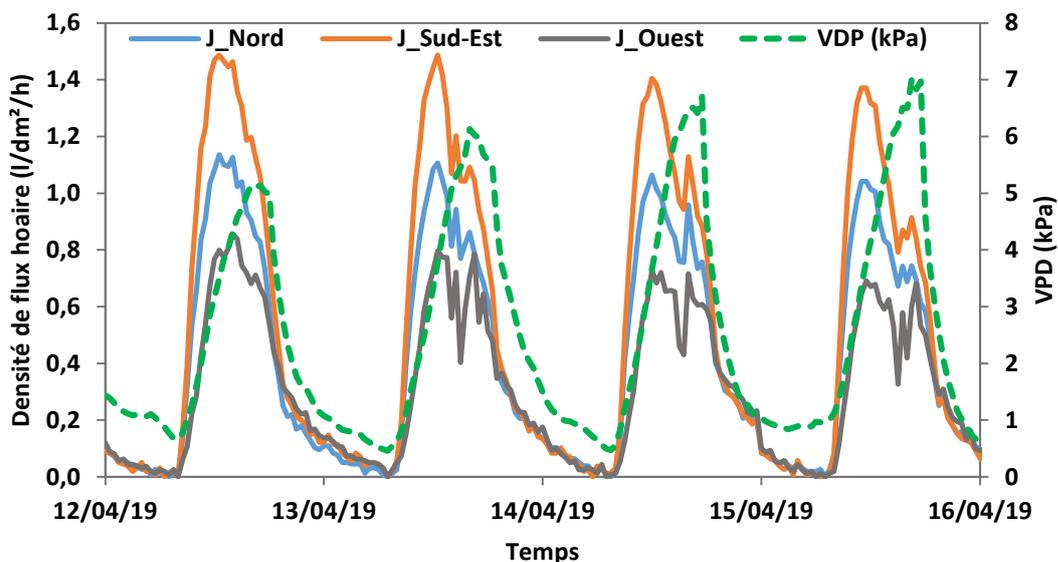


Figure 8 : Exemple de variabilité azimutale du 14 au 16/04/2019 correspondant à la période de forte feuillaison pour l'individu 46.

La densité de flux maximale est de 1,19 l/dm²/h pour le TA_Nord. Ce fluxmètre inséré au Nord a une densité de flux plus importante que celui de l'Ouest (0,86 l/dm²/h pour le TA_Ouest). L'orientation des branches, l'émondage et les ombrages entre individus peuvent inverser la situation. L'analyse de la variance des moyennes journalières de la densité de flux des cinq individus échantillonnés durant la période du 12 au 16/04/2019 montre une différence significative entre les azimuts ($P < 0,0001$). Les variabilités azimutales sont importantes (Fig. 9). En moyenne le coefficient de variation maximal obtenu durant la période de forte feuillaison est de l'ordre de 43,34%.

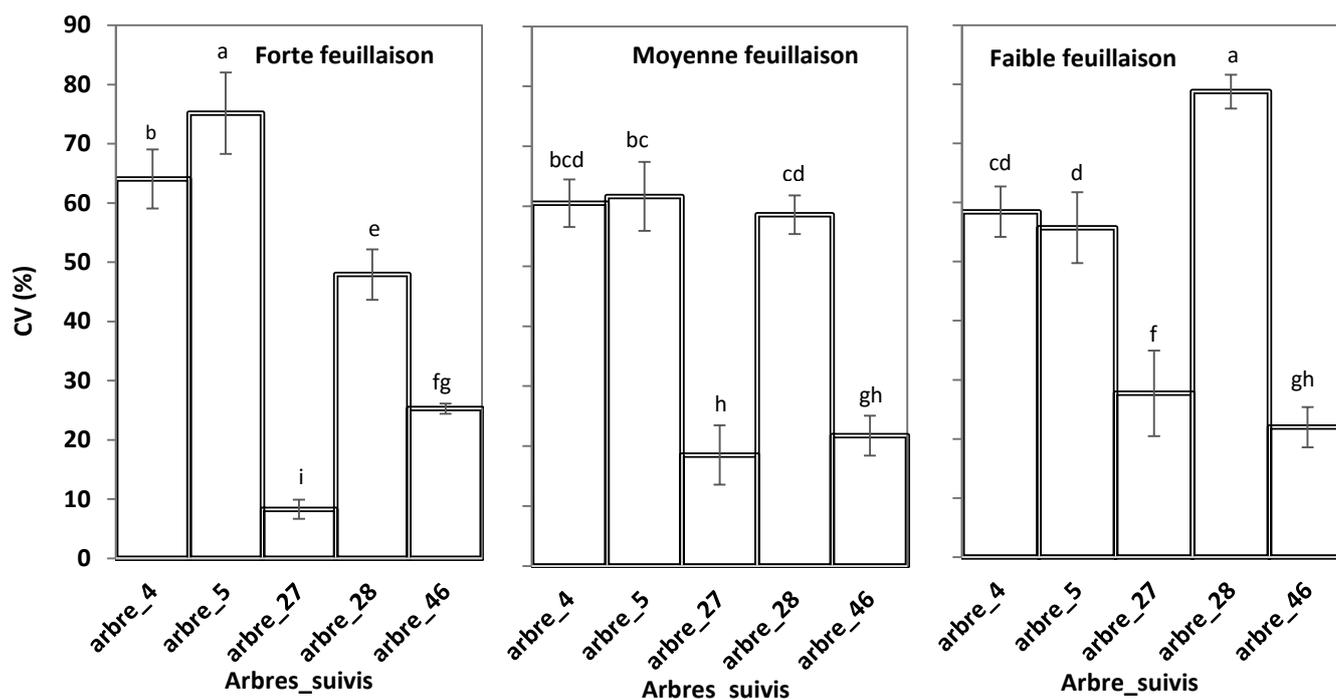


Figure 9 : Synthèse des ordres de grandeurs des coefficients de variation (CV) de la densité azimutale. Les barres d'erreur représentent les écart-types.

Ce CV varie fortement entre les individus (8% pour l'individu 46 et 79% pour le 28). Cette variabilité se maintient durant toute la phase de défeuillaison. Les individus 27 et 46 présentent les plus faibles CV azimutal durant toutes les périodes. L'analyse de la variance du facteur azimut sur la densité de flux maximale a révélé un effet très hautement significatif sur les différentes périodes de feuillaison et sur les individus ($P < 0,0001$). Cela veut dire que la densité de flux externe suivant les azimuts est différente chez les cinq individus et durant toute la période de défeuillaison.

5. Variabilité radiale de la densité de flux

Le rapport des densités internes de flux par rapport à la valeur dans l'anneau du xylème le plus externe (J/J_i) présente une forte décroissance vers l'intérieur (1 à 0,38) dès le deuxième anneau conducteur (profondeur moyenne à 4,5cm, Fig.10). Les variations de densité de flux ne sont pas importantes à l'intérieur entre les profondeurs de 7,5 et 10,5 cm.

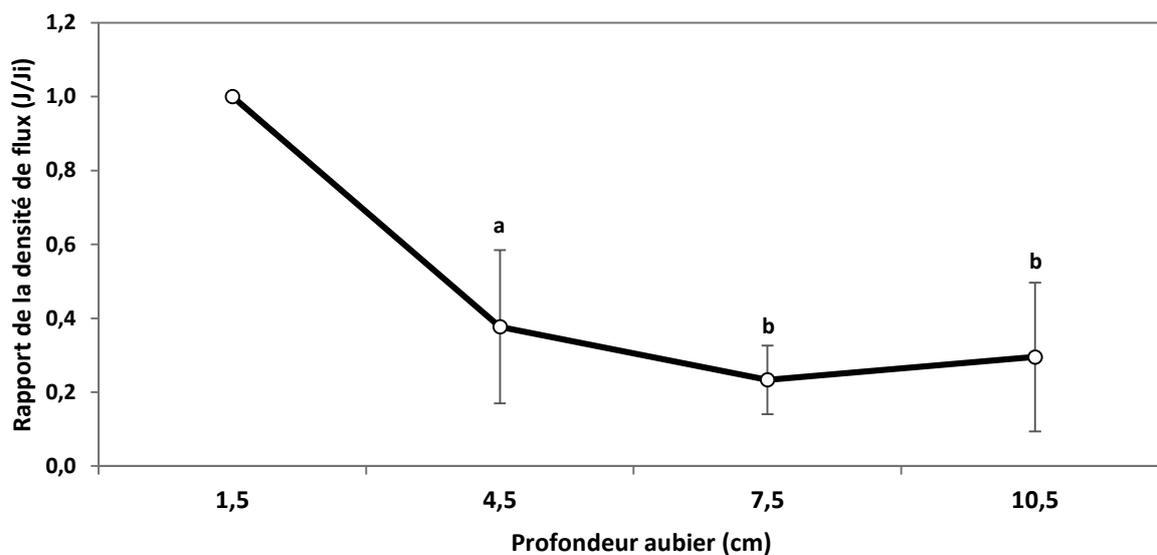


Figure 10 : Profil radial moyen des cinq individus. Les barres d'erreur correspondent aux écarts-types.

L'analyse de la variance des densités de flux azimuthale et radiale confirme qu'il y a une différence significative entre les densités de flux des fluxmètres externes et internes (analyse sur les valeurs absolues, $P < 0,02$). Par contre les différences ne sont plus significative entre les densités de flux des fluxmètres internes ($P = 0,139$, tableau 3). On retrouve globalement une forte décroissance entre l'anneau le plus externe et l'intérieur pour les cinq individus (Fig.11), mais à l'intérieur il y a certaines différences entre individus.

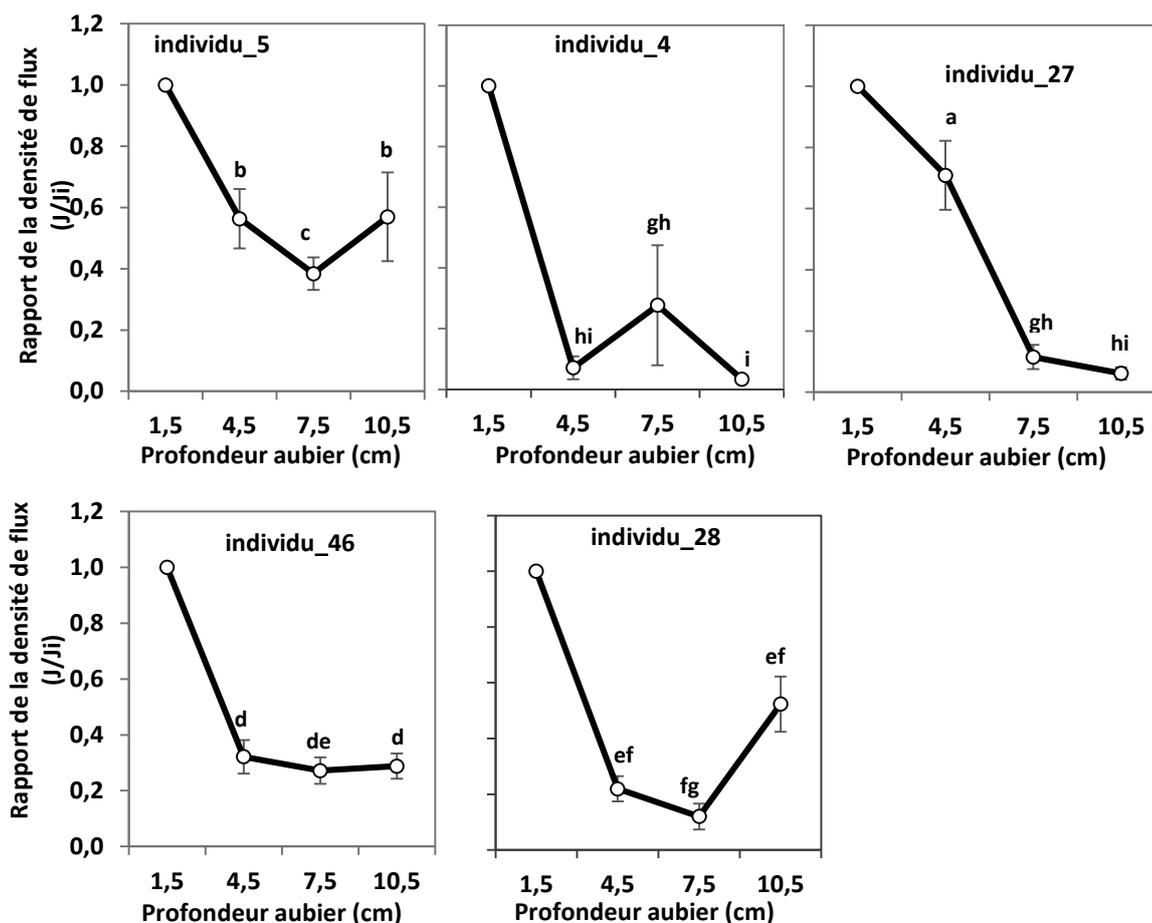


Figure 11 : Variabilité radiale du rapport densité de flux interne par rapport à la valeur la plus externe (J/J_i) par individu. Les barres d'erreur correspondent aux écart-types par individu.

Tableau 3: Résultats de l'analyse de la variance de la densité de flux journalière.

Densités de flux journalières	Arbre	Profil radial	Arbre x profil radial
Densité de flux journalière entre l'anneau externe et interne	<0,0001***	<0,0001***	<0,0001***
Densité de flux journalière entre les anneaux externes	<0,0001***	<0,0001***	<0,0001***

*** très hautement significatif au seuil de 5%.

6. Dynamique moyenne du flux total

Les courbes de variation de l'ETo, de la feuillaison et du flux total présentent des allures décroissantes similaires (Fig.12). L'ETo montre une tendance décroissante avec une assez forte variation inter-journalière. Le maximum de feuillaison de la période d'étude est observé au début du mois d'avril entre le 10/04 et 14/04 (60% de feuilles en moyenne).

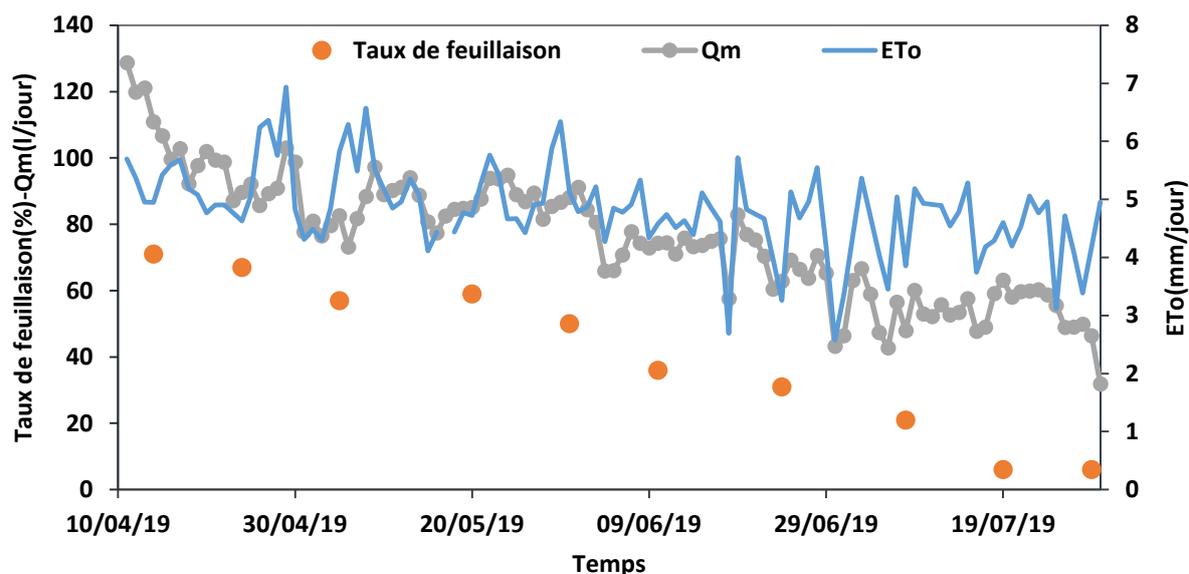


Figure 12 : Dynamique de la feuillaison, du flux total et de l'ETo durant la période de l'étude.

La pente est similaire quand on compare le taux de feuillaison et le flux total. Le maximum de flux des cinq individus échantillonnés est obtenu durant la phase de plus forte feuillaison (121 l/jour en moyenne). Les flux élevés sont mesurés durant les périodes où la demande évaporatoire est importante ($ETo=5,17$ mm/jour). En considérant la densité de 6,8 arbres par ha la consommation maximale correspond à une valeur très modeste en mm/jour 0,06.

7. Influence du taux de feuillaison et de l'ETo sur la dynamique du flux

L'analyse confirme que la variation du flux total est plus fortement reliée avec la feuillaison qu'avec l'ETo ($R^2=0,82$ contre 0,31, Fig.13). Le rapport Qm/ETo est relié à la feuillaison avec un coefficient de détermination de 0,60 (Fig.14). Il est à noter que ce coefficient est inférieur à celui obtenu entre le flux total et la feuillaison seule, ce qui est relativement étonnant.

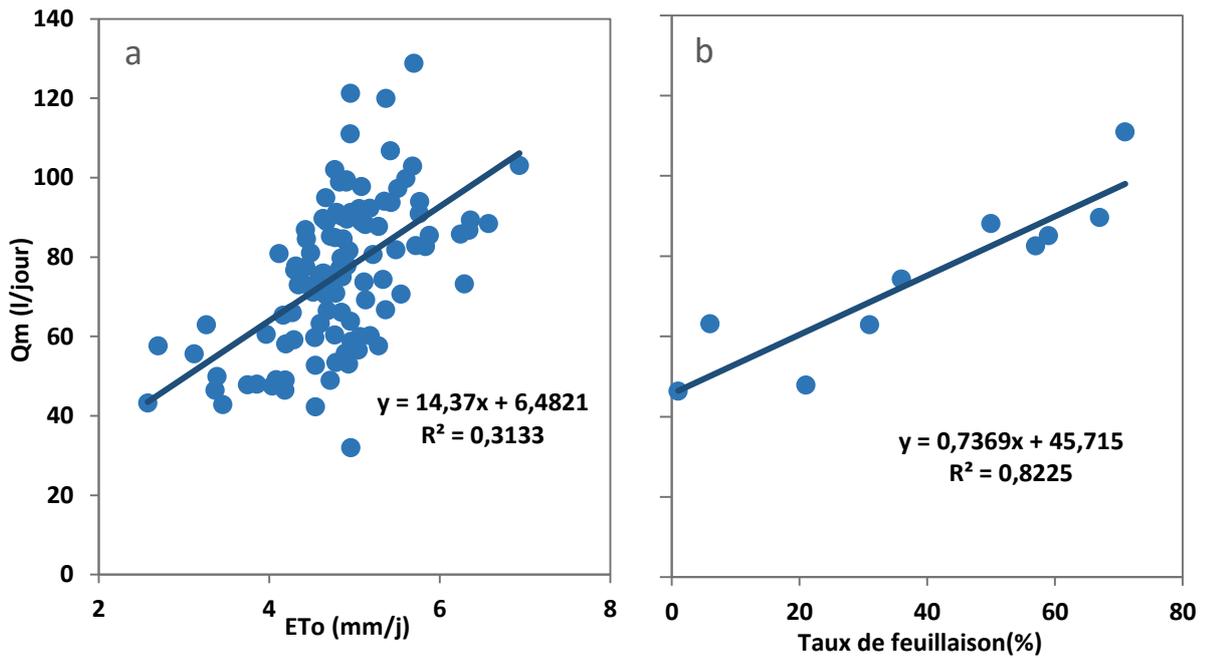


Figure 13 : Relation entre la feuillaison, l'ETo et le flux total. a-relation flux total et l'ETo. b-relation flux total et taux de feuillaison.

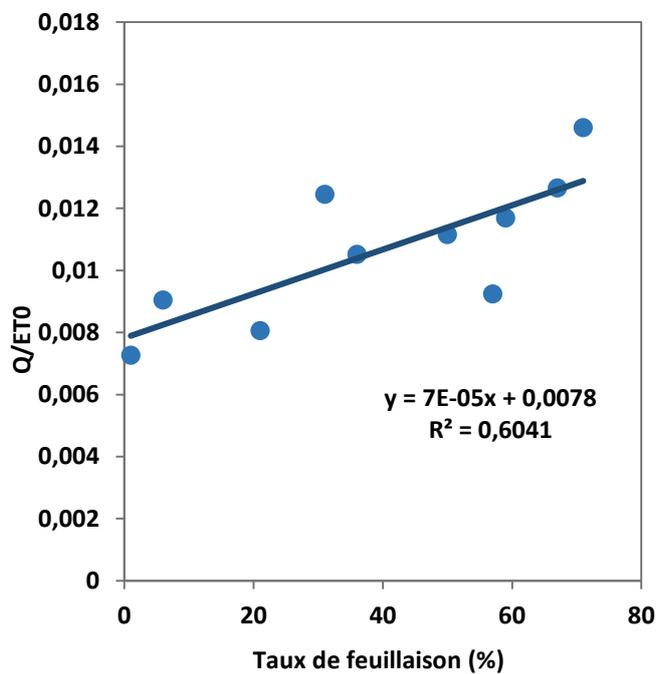


Figure 14 : Relation entre Q_m/ET_o et le taux de feuillaison.

La feuillaison impacte très fortement la dynamique du flux donc pour approfondir l'analyse nous scindons schématiquement la phase de défeuillaison en trois périodes : forte feuillaison (71 à 61%), moyenne feuillaison (50 à 35%) et faible feuillaison (inférieur ou égal à 20%).

8. Effet de la dimension des individus

8.1 Densité de flux et circonférence

La représentation de la densité de flux en fonction des circonférences montre des remarquables tendances positives (Fig.15). La tendance la plus élevée est observée durant la période de moyenne feuillaison ($R^2=0,50$). Toutefois ces relations ne sont pas significatives ($P>0.05$). Cela peut être lié au nombre relativement modeste d'arbres considérés (5 arbres).

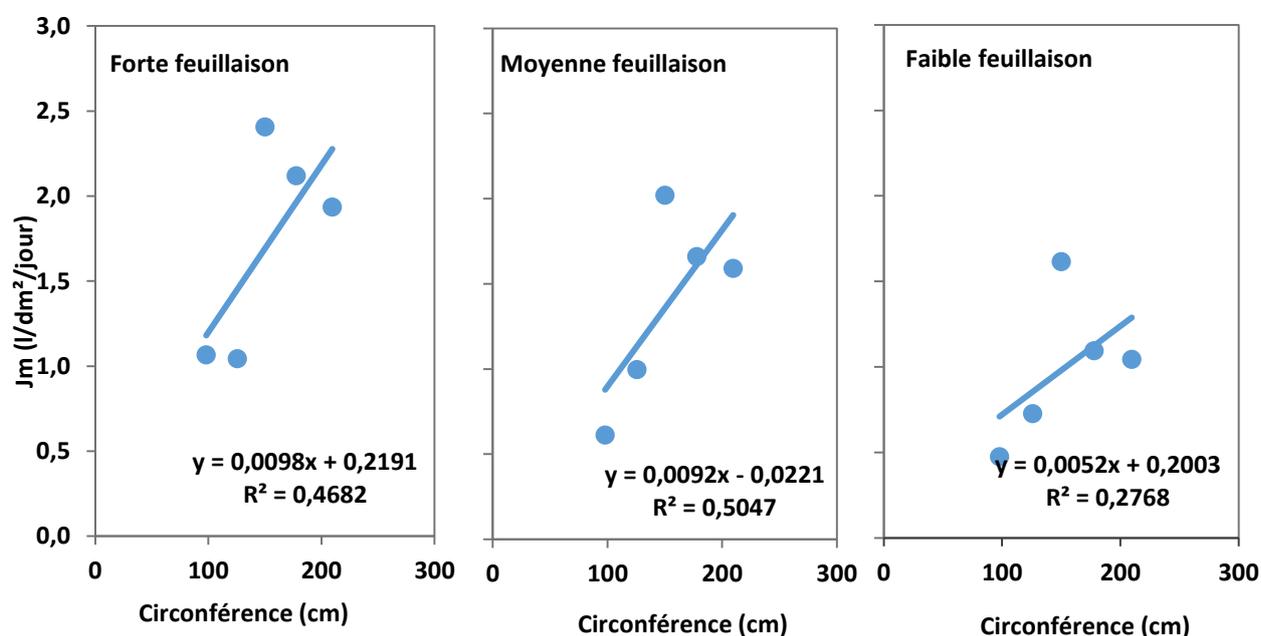


Figure 15 : Relation entre la circonférence et la densité de flux à différentes périodes de défeuillaison.

8.2 Flux total et circonférence

Il existe des relations fortes entre le flux journalier et la circonférence des individus (Fig.16). Durant toutes les périodes, on note une relation positive entre le flux total et la circonférence. La plus forte relation est obtenue durant la période de moyenne feuillaison ($R^2=0,87$). Les relations en forte et moyenne feuillaison sont significatives ($P < 0.05$) malgré le faible nombre d'arbre.

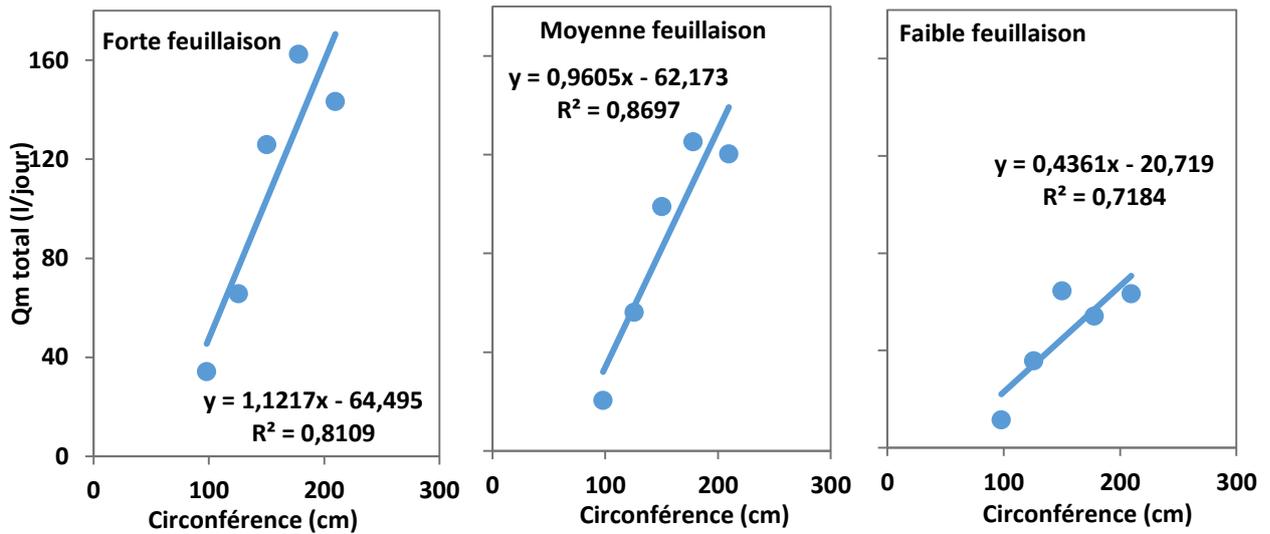


Figure 16 : Relation entre les flux total et la circonférence à différentes périodes de défeuillaison.

Toutefois, contrairement à la densité de flux, le calcul du flux total inclut indirectement la circonférence via la surface conductrice des anneaux. La tendance déjà positive de la relation densité de flux avec la circonférence vient renforcer une relation entre flux total et circonférence.

9. Possibilité de prédiction de la transpiration ?

Les équations (6) et (7) décrivent le modèle physique de la transpiration et un modèle de réponse aux facteurs de l'environnement. Nous ne disposons pas des mesures bases comme le LAI pour établir de tels modèles. Toutefois les relations obtenues avec la circonférence et le taux de feuillaison permettent d'envisager un modèle statistique simple de la transpiration journalière. Les variations d' ET_0 ou de VPD ne sont pas introduites car pour la période d'étude la réponse de la transpiration à la demande évaporatoire n'est apparente à l'échelle inter-journalière. De même, il n'est pas nécessaire de considérer la réserve hydrique du sol en surface qui a très peu varié. Dans le détail, la circonférence du tronc peut constituer un proxy de la transpiration maximale des individus et le taux de feuillaison un proxy des variations de LAI venant réduire cette transpiration maximale.

Le meilleur modèle statistique (Eq.19) obtenu est:

$$Q_m = 0,543 * \text{Circonférence} + 4,918. 10^{-3} * \text{Taux de feuillaison} * \text{circonférence} - 40,699 \quad (19)$$

Avec un $R^2=0,78$ les paramètres du modèle (tableau 4) sont les suivants :

Tableau 4: Paramètres du modèle d'estimation de la transpiration.

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-40,700	13,100	-3,107	0,003**	-67,054	-14,346
Circonférence	0,543	0,090	6,012	<0,0001***	0,361	0,725
Taux de feuillaison*circonférence	0,005	0,001	5,625	<0,0001***	0,003	0,007

**** très hautement significatif au seuil respectif de 5%.

La relation flux total mesuré et flux estimé par le modèle montre une forte tendance avec un coefficient de détermination R^2 égal à 0,78 (Fig.17). La précision du modèle mathématique est de 83%.

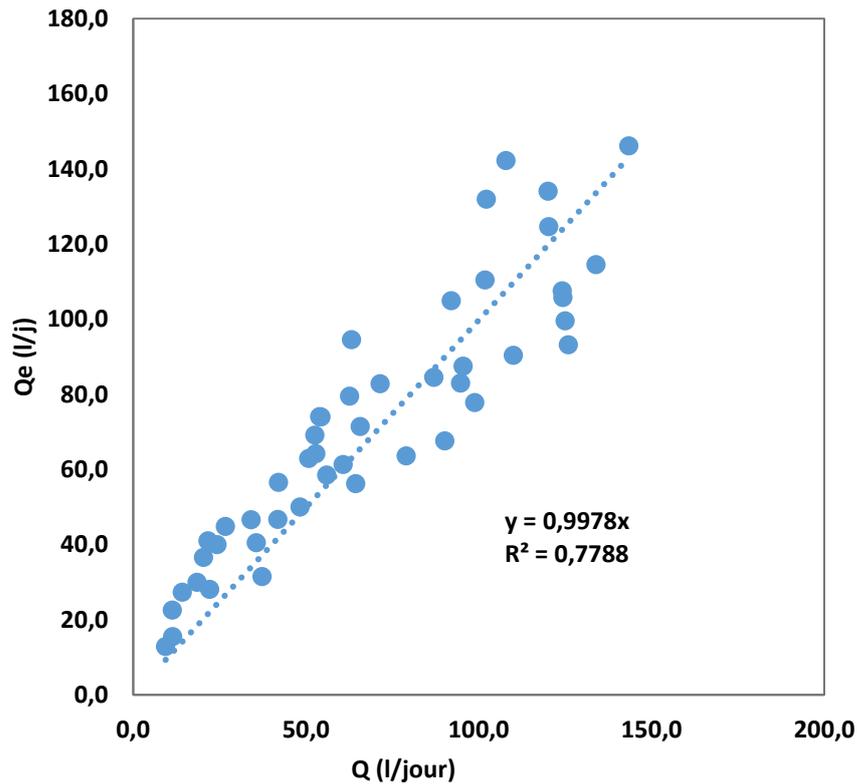


Figure 17 : Relation entre le flux total mesuré (Q) et le flux estimé par le modèle (Qe).

Ces résultats suggèrent qu'il est possible d'estimer la transpiration des individus du peuplement en prenant en compte le taux de feuillaison et la distribution des circonférences de tronc, ceci au moins en milieu et fin de saison sèche.

Chapitre IV : Discussion

Pour mémoire, l'objectif principal de l'étude était de quantifier la transpiration de *F. albida* et de caractériser ses principaux facteurs de contrôle en saison sèche. Les quatre mois d'étude ont concerné la phase de défeuillaison en fin de saison sèche. La méthode thermique à dissipation transitoire avec une simple aiguille (Do et *al.*, 2011) a été utilisée sans difficultés pour estimer la transpiration des arbres.

Une contrainte hydrique non négligeable ?

Les résultats infirment notre hypothèse de faible contrainte hydrique en saison sèche. En phase de défeuillaison (juin), le potentiel hydrique foliaire de base a été mesuré à -0,9 MPa, soit relativement contraint. Après la première pluie, la contrainte hydrique a diminué et le potentiel hydrique foliaire de base a ensuite augmenté significativement pour atteindre environ -0,5 MPa. Cette réduction de la contrainte pourrait être liée à l'accélération de la défeuillaison. Cette dernière diminue la transpiration, facilite la réhydratation nocturne de l'arbre et réduit ainsi la tension hydrique dans le système. En présence de feuilles et sous l'effet des facteurs climatiques, l'arbre est soumis aux conditions de transpiration ; même s'il ferme ses stomates il y a toujours un peu de flux de transpiration quand le VPD est non nul ce qui a été souvent le cas dans nos conditions. La chute progressive des feuilles peut ainsi entraîner une remontée du potentiel hydrique foliaire de base (Ameglio et Archer, 1996 ; Eamus et Prior, 2001 ; Do et *al.*, 2008). Toutefois notre observation d'un potentiel hydrique foliaire de base relativement contraint diffère des résultats de Roupsard et *al.* (1999) qui trouvaient une valeur stable autour de -0,5 MPa chez la même espèce au Burkina Faso, pour une nappe aux alentours de 8 m, soit un peu plus bas que la nôtre. Les conditions ne sont pas les mêmes mais il peut aussi s'agir d'une sous-estimation du potentiel hydrique foliaire de base de notre part. En effet, grâce à un test comparatif, nous avons noté en particulier un artefact de déshydratation lors du transport et de la mise en attente des échantillons. Ces mesures devront être répétées avec le protocole optimisé pour approfondir nos résultats.

Une densité maximale de flux en moyenne de 1,85 l/dm²/h.

Les résultats confirment notre hypothèse initiale d'une densité maximale de flux dans l'anneau externe du xylème entre 1 et 3 l/dm²/h. La densité de flux a fortement varié durant la période de défeuillaison. Cette variation peut s'expliquer par la réduction de la surface foliaire via la défeuillaison et par la régulation stomatique à certaines heures de la journée. *F. albida* peut

contrôler l'ouverture et la fermeture des stomates en cas de variation du VPD (Roupsard, 1997). Nos résultats sont du même ordre de grandeurs que ceux de Roupsard et *al.* (1999) qui se situaient entre 1 et 3,5 l/dm²/h.

Une grande variabilité azimutale des densités de flux avec des différences individuelles.

Les résultats confirment notre hypothèse initiale. La moyenne générale du coefficient de variation entre les azimuts du tronc a été de l'ordre de 40% durant toute la période de défeuillaison étudiée. Cette variabilité azimutale individuelle s'est maintenue durant toute la phase de défeuillaison. La variabilité azimutale de la densité de flux externe avec un effet individu peut s'expliquer par des hétérogénéités spatiales de fonctionnement de la canopée et des racines connectées aux différents azimuts, ainsi que de la structure interne du xylème du tronc qui est fonction, de la densité des vaisseaux du xylème (Tateishi et *al.*, 2008 ; Issoufou et *al.*, 2015). L'état sanitaire, la vigueur et l'âge des arbres peuvent également influencer la variabilité observée (Awessou et *al.*, 2019).

Enfin, conformément aux résultats de Han et *al.* (2019) selon lesquels, il existe des changements quotidiens et saisonniers de la densité de flux azimutale chez *Pinus densiflora*, l'étude soutient la pertinence d'appliquer les mesures sur un grand nombre d'individus avec encore plus de fluxmètres par individu.

Une forte décroissance radiale centripète de la densité de flux dans le tronc.

Les résultats confirment l'hypothèse initiale de forte décroissance de la densité de flux (60% en moyenne) dans la profondeur du xylème. Nos observations sont similaires à celles de Roupsard et *al.* (1999) sur la même espèce. Ce constat rejoint les résultats de Dang et *al.* (2014) et Awessou et *al.* (2017) qui ont montré que le rapport J/J_i diminue de la périphérie au centre de l'aubier (*V. paradoxa*). Cette décroissance est attribuée à la diminution des propriétés conductrices de l'aubier vers le centre du tronc jusqu'à la production de bois de cœur (Jiménez et *al.*, 2000 ; Nadezhdina et *al.*, 2002).

L'importance de la variabilité inter-individu du profil radial est un résultat moins connu dans la littérature. Cette variabilité entre individus pourrait être expliquée par une activité variable de parties anciennes de la canopée ou du système racinaire selon les individus, ou par des phénomènes de réhydratation hydrique interne plus ou moins marqués.

Une consommation maximale en eau de 121 l.

Pour un individu moyen, ayant un diamètre de 50 cm, la consommation maximale d'eau a été estimée à 121 l par jour. Ce résultat confirme l'hypothèse initiale d'une transpiration entre 100 et 200 l pour un individu mature. Ces valeurs ont été obtenues en début de défeuillaison donc avec une feuillaison relativement forte. La demande évaporatoire reste importante durant cette période. Le VPD et l'ETo étaient respectivement de 6,70 kPa et 5,17 mm/jour. Pour des arbres ayant un diamètre similaire, Bazié et al. (2018) ont trouvé chez *V. paradoxa* une consommation maximale d'eau du même ordre de grandeur (151 l). Pour des diamètres inférieurs, Do et al. (2008) et Alcorn et al. (2013) ont trouvé respectivement sur *Acacia raddiana* et *Eucalyptus pilularis* des valeurs très inférieures. Awessou et al. (2017) ont trouvé une consommation journalière de 92,6 l chez *Isobertinia doka* et de 26,8 l chez *V. paradoxa* pour des diamètres compris entre 8 et 38 cm. Les valeurs trouvées par Meinzer et al. (2004) sur *Anacardium excelsum* sont 6 fois supérieures à nos valeurs (785 l).

Des variations substantielles de transpiration estimée peuvent s'expliquer par des différences entre les espèces, entre les individus, dans leur phase de vie, dans les conditions pédo-climatiques et dans les méthodes de mesure de flux. La consommation d'eau en mm s'avère très modeste avec 0,06 mm/jour de par la faible densité de l'arbre. L'association avec les autres cultures s'avèrent alors bénéfique pour un faible impact a priori sur le bilan hydrologique.

Une relation relativement modeste de la transpiration avec la demande évaporatoire à l'échelle inter-journalière.

Ce résultat infirme l'hypothèse initiale. Le VPD est supposé être la force motrice principale de la transpiration foliaire (Alvarado et al., 2015 ; Bazié et al., 2018). La relation à l'échelle horaire entre la densité de flux et le VPD infirme ce point. D'autre part, l'importance de la boucle d'hystérésis soutient un rôle important des réserves hydriques de l'arbre dans la transpiration chez *F. albida*, avec une mobilisation le matin et une reconstitution l'après-midi (Ma et al., 2017). Toutefois à l'échelle inter-journalière et sur les quatre mois d'étude, la relation de la transpiration avec l'ETo est très modeste. La relation avec le taux de feuillaison est même dégradée quand le taux est normalisé par l'ETo. Dans ces conditions d'ETo supérieure à 3 mm/jour, nous en concluons qu'à l'échelle inter-journalière la conductance stomatique est déjà fortement régulée et que la variation de la transpiration est surtout déterminée par le taux de feuillaison.

Une forte relation du flux total avec le taux de feuillaison.

Ce résultat confirme l'hypothèse initiale. Le flux total est fortement relié au taux de feuillaison avec un coefficient de détermination de 0,82. Do et *al.* (2008) ont obtenu une relation similaire avec un coefficient de détermination de 0,9 chez *Acacia raddiana*. Le taux de feuillaison est indicateur des variations de la surface foliaire et par conséquent de la surface potentiellement transpirante (Roupsard et *al.*, 1999 ; Francescantonio et *al.*, 2018). La force de cette relation simple, sur une période de quatre mois implique que les variations de demande évaporatoire et de disponibilité en eau du sol ont une influence moindre dans ces conditions de fin de saison sèche et fin de défeuillaison. Cette conclusion supporte le fait qu'à cette période les arbres s'alimentent principalement à partir de la nappe. La force de cette relation ouvre dans ces conditions une perspective d'estimation relativement simple des variations de la transpiration.

Une relation très forte du flux total avec la circonférence des individus.

Ce résultat avec des R^2 supérieur à 0,8 confirme l'hypothèse initiale pour les stades de forte et moyenne feuillaison. Ce résultat s'explique en grande partie par la relation directe entre circonférence du tronc et surface conductrice de xylème, la surface foliaire totale étant elle-même supposée proportionnelle à la surface conductrice de xylème. Tsuruta et *al.* (2019) ont aussi trouvé chez le cyprès japonais (*Chamaecyparis obtusa*) une forte relation entre le flux total et le diamètre des troncs.

Il s'agit d'une relation attendue quand la densité externe de flux et le profil radial ne varient pas entre les individus car la surface conductrice devient le seul facteur de variation. Mais une originalité de nos résultats est que la densité de flux comme le profil radial ont montré une variabilité inter-individu significative. Au final, la relation entre flux total et circonférence est même renforcée par la variabilité de la densité de flux car celle-ci montre une tendance positive avec la circonférence du tronc. Cette tendance n'est pas commune, en général la densité de flux ne varie pas avec la taille des individus comme l'ont observé Tsuruta et *al.* (2019). Dans le cas de *F. albida*, cet accroissement pourrait s'expliquer par un accès à la nappe, facilité par le développement racinaire des plus grands individus. Cette hypothèse mérite un approfondissement avec un accroissement du nombre d'individus étudiés selon un gradient de taille.

Vers un modèle simple d'estimation de la transpiration du peuplement.

Les résultats ont confirmé la possibilité d'estimer grossièrement la transpiration journalière à partir d'un modèle statistique simple fonction de la circonférence des arbres et du taux de feuillaison. La prise en compte de la demande évaporatoire et/ou de la disponibilité en eau des horizons de sol en surface n'a pas été nécessaire. Il est vraisemblable que la validité de ce modèle soit limitée à la période d'étude et aux conditions particulières du site de Niakhar. Toutefois, il peut permettre une évaluation plus précise de la transpiration du peuplement en prenant en compte la distribution exhaustive des circonférences de tronc et il constitue une base vers un modèle plus générique intégrant l'ensemble des saisons.

Au final un fait marquant à souligner est le contraste entre le fonctionnement individuel et le modèle simple d'estimation : le fonctionnement individuel montre une certaine hétérogénéité de la densité de flux, de la variabilité azimutale et du profil radial qui est vraisemblablement le reflet de différences structurelles. Les allures des houppiers comme celle des racines proximales sont assez différentes entre les individus et cela doit impacter la surface foliaire évaporatoire comme la colonisation racinaire du sol et sa surface d'absorption racinaire. Chaque individu reflète les conditions particulières d'installation juvénile, de développements aérien et racinaire plus ou moins impactées par l'action d'Homme (travail du sol, élagages des branches...). Mais le modèle simple d'estimation à partir de la circonférence du tronc et du taux de feuillaison montre un résultat final assez homogène d'utilisation de la ressource en eau. Cela pourrait traduire l'adaptation de *F. albida* à son milieu.

Conclusion

Cette étude a permis de quantifier la transpiration de l'espèce agroforestière *F. albida* durant la phase de défeuillaison et de caractériser ses principaux facteurs de contrôle, le taux de feuillaison et la circonférence des individus.

Dans le détail, le profil radial de densité de flux de sève présente une forte décroissance de l'extérieur vers l'intérieur du xylème. Egalement, l'effet individu est important sur les variabilités azimutale et radiale de densité de flux. Il est ainsi nécessaire d'intégrer ces variabilités pour une quantification fiable de la transpiration des arbres.

Au final, nous avons pu proposer un modèle d'estimation de la transpiration du peuplement basée sur la circonférence des individus et le taux de feuillaison foliaire.

Cette étude a également permis de comprendre qu'avec la densité observée à Sob, le peuplement de *Faidherbia albida* consomme une infime partie de l'eau disponible.

L'association avec les cultures est alors bénéfique avec une faible possibilité de compétition d'autant plus que l'arbre a une phénologie inversée.

Pour mieux comprendre l'exploitation de l'eau par *F. albida* et sa relation avec son écosystème nous recommandons de :

- Faire l'étude sur un cycle annuel complet avec un échantillon plus grand ;
- Réaliser l'étude du système racinaire et de la profondeur racinaire qui sont également des facteurs importants en s'orientant vers la détermination du profil de prélèvement hydrique au cours du cycle ;
- Effectuer une comparaison pluri-annuelle avec des saisons contrastées.

Références bibliographiques

- Alcorn P.J., Forrester D.I., Thomas D.S., James R., Smith, R.G.B., Nicotra A.B. & Bauhus J. (2013). Changes in whole tree water use following live crown pruning in young plantation grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana*. *Forests* **4** (1) : 106-121. Disponible sur <https://doi.org/10.3390/f4010106>.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. & Smith M. (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO.
- Alvarado B.M.S., Holwerda F., Geisserter D.R., & Lysette E. (2015). Nighttime transpiration in a seasonally dry tropical montane cloud forest environment. *SpringLink Trees*, **29** : 259-274.
- Ameglio T.T. & Archer P. (1996). Représentativité du potentiel de base sur sols à humidité hétérogène. *Agronomie* **16** (8) : 493-503.
- Aubinet M., Chermanne B., Vandenhoute M., Longdoz B., Yernaux M. & Laitat E. (2001). Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agricultural and Forest Meteorology* **108** (4) : 293-315. Consulté le site [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00244-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00244-1).
- Awessou K.G., Peugeot C., Rocheteau A., Seguis L., Do F.C., Galle S., Bellanger M., Agbossou E. & Seghieri J. (2017). Differences in transpiration between a forest and an agroforestry tree species in the sudanian belt. *Agroforestry Systems* **91** (3): 403-413. Disponible sur <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9937-8>.
- Awessou K.G., Peugeot C., Agbohessou E. & Seghieri J. (2020). Consommation en eau d'une espèce agroforestière en zone soudanienne. *Agroforesterie et Services Écosystémiques En Zone Tropicale*, 147-158.
- Balding F.R, Cunningham G.R. & Plummer R.F. (1973). Inexpensive self contained system for field measurements of gas exchange. 382-386.
- Barmo S., Amani A., Soumana I., Ichaou A. & Karim S. (2019). Structure et diversité des parcs agroforestiers adjacents à la forêt protégée de Baban Rafi, Niger, Afrique de l'Ouest. 20.
- Bayala J., Sanou J., Teklehaimanot Z., Ouedraogo S., Kalinganire A., Coe R. & VanNoordwijk M. (2015). Advances in knowledge of processes in soil-tree-crop interactions in

- parkland systems in the west african sahel : a review. *Agric Ecosystem environ* **205** : 25-35.
- Bayala J., Heng L.K., Noordwijk M. & Ouedraogo S.J. (2008). Hydraulic redistribution study in two native tree species of agroforestry parklands of west african dry savanna. *Acta Oecologica* **34** (3): 370-378. Consulté le site <https://doi.org/10.1016/j.actao.2008.06.010>.
- Bazié H.R., Sanou J., Bayala J., Bargués-Tobella A., Zombré G. & Ilstedt U. (2018). Temporal variations in transpiration of *Vitellaria Paradoxa* in West African agroforestry parklands. *Agroforestry Systems* **92** (6) : 1673-1686. Disponible sur le site <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0115-4>.
- Boffa J.M. (2000). Les parcs agroforestiers en Afrique de l'Ouest : clés de la conservation et d'une gestion durable. *Unasylva* 200, **51** : 11-17.
- Boulier F. & Jouve P. (1990). Evolution des systèmes de production Sahéliens et leur adaptation à la sécheresse. CIRAD-DSA. Consulté le site <http://agritrop.cirad.fr/351070/>.
- Boukougou E.G., Alexandre D.Y., Ayek E.T., Morant P. & Ouadba J.M. (1994). Agroforestry parklands of the west african semi-arid lands. *Conclusions and Recommendations of an International Symposium*, CIRAF/SALWA, 22-25 Oct 1993, Ouagadougou, Burkina Faso. 18.
- Buttoud G. (2013). Advancing Agroforestry on the Policy Agenda: A Guide for Decision-Makers. Agroforestry Working Paper 1. Rome: FAO.
- Buyinza J., Muthuri C.W., Downey A., Njoroge J., Denton M.D. & Nuberg I.K. (2019). Contrasting water use patterns of two important agroforestry tree species in the mt elgon region of Uganda. *Australian Forestry* **82** : 57-65. Disponible sur <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1547944>.
- Campa C., Grignon C., Gueye M. & Hamon S. (1996). L'acacia au Sénégal. In (édition), Dakar : Orstom, 480.
- Charreau C. & Vidal P. (1965). Influence de l'*Acacia albida* Del. sur le sol, nutrition minérale et rendements des mils Pennisetum au Sénégal.
- Chevalier A. (1928). Révision des Acacia du nord, de l'ouest et du centre africain. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée* **8** (77) : 46-52. Disponible sur <https://doi.org/10.3406/jatba.1928.4036>.

- Coppin P.A. & Taylor J. (1973). A three component sonic anemometer/thermometer system for general micrometeorological research, boundary layer meteorol. **27** : 27-42.
- CTFT. (1988). *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. (Synonyme : *Acacia albida* Del.) : monographie. *Agritrop*. <http://agritrop.cirad.fr/375602/>.
- Daley P.F., Cloutier C.F. & Mcneil J.N. (1984). A canopy porometer for photosynthesis studies in field crops. *Canadian Journal of Botany*. Disponible sur <https://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/b84-046#.XbccGoj7TIU>.
- Dang H.Z., Zha T.S., Zhang J.S., Li W. & Liu S. (2014). Radial profile of sap flow velocity in mature xinjiang poplar (*Populus alba* L. Var. *Pyramidalis*) in Northwest China. *Journal of Arid Land* **6** (5) : 612-627. Consulté le site <https://doi.org/10.1007/s40333-014-0007-7>.
- Dembele D. (1994). Ecophysiologie de *Faidherbia albida*, sa repartition et son effet agronomique. Mémoire de fin d'étude. Université Ouagadougou.
- Do F.C., Isarangkool Na Ayutthaya S. & Rocheteau A. (2011). Transient thermal dissipation method for xylem sap flow measurement : implementation with a single probe. *Tree Physiology* **31** (4) : 369-380. Disponible sur <https://doi.org/10.1093/treephys/tp020>.
- Do F.C., 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** (1) : 95-104. Consulté le site <https://doi.org/10.1093/treephys/28.1.95>.
- Do F. & Rocheteau A. (2002). Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. *Tree Physiology* **22** (9) : 649-654. Disponible sur <https://doi.org/10.1093/treephys/22.9.649>.
- Do F., Rocheteau A., Diagne A.L. & Grouzis M. (2011). Flux de sève et consommation en eau d'*Acacia tortilis* dans le Nord Ferlo. 19.
- Dupuy N.C. & Dreyfus B.L. (1992). Bradyrhizobium populations occur in deep soil under the leguminous tree *Acacia albida*. *Applied and Env. Microbiol*, **58** : 2415-2419.
- Dye P.J. (1996). Response of *Eucalyptus grandis* trees to soil water deficits. *Tree Physiology* **16** (1-2) : 233-238. Consulté le site <https://doi.org/10.1093/treephys/16.1-2.233>.
- Fagg C.W. & Barnes R.D. (1990). Africa acacias : study and acquisition of the genetic resources. 170.

- FAO. (2013). Agroforesterie : la grande diversité dans un système agroforestier, en Ethiopie, sec. *Pratique de la gestion durable des terres*. 132-147.
- Faye W. (2018). Climatic variability in the Sine-Saloum basin and its impacts on water resources : case of the sob and diohine watersheds in the region of Niakhar. 10.
- Flo V., Martinez-Vilalta J., Steppe K., Schuldt B. & Poyatos R. (2019). A Synthesis of Bias and Uncertainty in Sap Flow Methods. *Agricultural and Forest Meteorology* **271** (June): 362-374. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.012>.
- Francescantonio D., Villagra M., Goldstein G. & Campanello P.I. (2018). Leaf phenology and water use patterns of canopy trees in northern argentinean subtropical forests. Édité par Daniel Epron. *Tree Physiology* **38** (12) : 1841-1854. Disponible sur le site <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy072>.
- Garrity D.P., Sullivan C.Y. & Watts D.G. (1984). Rapidly determining sorghum canopy photosynthetic rates with a mobile field chamber. *Agronomy Journal* **76** (1) : 163-165. Disponible sur <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600010040x>.
- Gelaw A.M., Singh B. & Lal R. (2015). Organic carbon and nitrogen associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. *Land Degrad* **26** : 690-700.
- Giffard P.I. (1974). L'arbre dans le paysage sénégalais sylviculture en saison sèche. *Dakar Sénégal, C.T.F.T*, 431.
- Giller K.E. (2001). Nitrogen fixation in Tropical cropping systems. *Annales des Sciences Forestières* **34** (1) : 17-45. Consulté le site <http://www.afs-journal.org/10.1051/forest/19770102>.
- Granier A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières* **42** (2) : 193-200. Consulté le site <https://doi.org/10.1051/forest:19850204>.
- Granier A. & Gross P. (1987). Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Annales des Sciences Forestières* **44** (1) : 1-14. Disponible sur <https://doi.org/10.1051/forest:19870101>.
- Granier A., Damesin C., Epron D. & Le Dantec V. (2000). Problématique du bilan de carbone dans les écosystèmes forestiers : exemple d'une jeune hêtraie de plaine. *Schweizerische Zeitschrift Fur Forstwesen* **151** (9) : 317-324. Consulté sur <https://doi.org/10.3188/szf.2000.0317>.

- Granier A., Loustau D. & Bréda N. (2000). A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science* **57** (8) : 755-765. Disponible sur le site <https://doi.org/10.1051/forest:2000158>.
- Han H., Zhang X., Dang H.Z., Song X.D., Meng P. & Zhang R.S. (2019). Azimuthal variation of the sap flow rate in the trunk of *Pinus Densiflora* planted in sandy land. *林业科学研究* **32** (2) : 39-45. Disponible sur le site <https://doi.org/10.13275/j.cnki.lykxyj.2019.02.006>.
- Isarangkool Na Ayutthaya S., Do F.C., Pannengpetch K., Junjittakarn J., Maeght J.L., Rocheteau A. & Cochard H. (2010). Transient thermal dissipation method of xylem sap flow measurement : multi-species calibration and field evaluation. *Tree Physiology* **30** (1) : 139-148. Disponible sur le site <https://doi.org/10.1093/treephys/tpp092>.
- Issoufou H.B.A., Rambal S., Le Dantec V., Oï M., Laurent J.P., Saadou M. & Seghieri J. (2015). Is the WBE model appropriate for semi-arid shrubs subjected to clear cutting? *Tree Physiology*, **35** : 197-208.
- Jarvis P.G. (1975). Water transfer in plants. In heat and mass transfer in the plant. Environment, Part 1. Eds. D.A. de Vries and N.G. Afgan. Scripta Book Co. Washington, DC : 18 369-394.
- Jiménez M.S., Nadezhdina N., Cermak J. & Morales D. (2000). Radial variation in sap flow in five laurel forest tree species in Tenerife, canary islands. *Tree physiology*, **20** : 1149-1156.
- Katerji N., Daudet F., Valancogne C., Bach M. & Fouère A. (1984). Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures. Détermination et importance. *Agronomie* **4** (8) : 779-787.
- Lalou R. (2015). Adaptation des systèmes de production et innovations. 463.
- Lalou R., Sultan B., Muller B. & Ndonky A. (2019). Does climate opportunity facilitate smallholder farmers adaptive capacity in the Sahel? *Palgrave Communications* **5** (1) : 81. Disponible sur le site <https://doi.org/10.1057/s41599-019-0288-8>.
- Laurent J.P. (1998). Intercomparaison des méthodes de mesure de la teneur en eau du sol par humidimétrie neutronique et TDR. 41.
- Lericollais A. (1969). Sob, en pays serer : l'évolution du terroir. ORSTOM -Dakar Hann. 19.
- Lericollais A. (1969). Un terroir Sérèr du Sine (Sénégal) : Sob (arrondissement de Niakhar). Centre O.R.S.T.O.M de Dakar-Hann. 221.

- Lericollais A. (1972). Sob : étude géographique d'un terroir Sérère (Sénégal). *Atlas des structures agraires au Sud*. 133.
- Loupe D., Ndour B. & Samba A. (1988). Influence de *Faidherbia albida* sur l'arachide et sur le mil au Sénégal. Deuxième partie sol et culture. 123-138.
- Loustau D., Porté A., Bosc A., Sinoquet H. & Kruijt B. (1991). Transpiration et photosynthèse du pin maritime : approches de modélisation du niveau de l'aiguille à l'échelle du couvert. *Revue Forestière Française*, **51** (2) : 266-280.
- Lu P., Urban L. & Zhao P. (2004). Granier's Thermal Dissipation (TDP) method for measuring sap flow in trees : theory and practice. **46** (6) : 631-646.
- Ma C., Yi L., Shao M., Li X., Sun L. & Xiaoxu J. (2017). Environmental controls on sap flow in black locust forest in loess plateau, China. *Scientific Reports* **7** (1) : 1-12. Disponible sur <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13532-8>.
- Meinzer F.C., James S.A. & Goldstein G. (2004). Dynamics of transpiration, sap flow and use of stored water in tropical forest canopy trees. *Tree Physiology*, **24** : 901-909.
- Moncrieff J.B. & Massheder J.M. (1997). A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *J.Hydrol*, **189** : 589-611.
- Monteith J.L. (1965). Evaporation and Environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* (19) : 205-234.
- Nadezhdina N., Cermák J. & Ceulemans R. (2002). Patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species : scaling errors associated with positioning of sensors. *Tree physiology*, **22** : 907-918.
- Ozier L. & Régis Tournebize H. (1993). Mesure des flux de sève par bilan thermique appliquée à l'estimation de la transpiration d'un arbuste (*Gliricidia sepium*) et d'un peuplement de canne à sucre (*Saccharum officinarum*). *Cahiers Agricultures* **2** (3) : 197-206.
- Peters D., Clough B.F. & Stahl G.R. (1974). Measurement of dark respiration, evaporation, and photosynthesis in field. *Agronomy Journal Abstract*. Digital Library <https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/66/3/AJ0660030460>.
- Roupsard O, Cournac L., Jourdan C., Orange D., Do F., Faye W., Gaglo E., Demarchi G., Sow S., Agbohessou Y., Diatta S., Diouf K., Tall L., Clermont-Dauohin C., Sanou J., Koala J., Audebert A., Ndour A., Faye E., Taugourdeau S., Sanogo D., Sall S., Sarr M.S., Duthoit M., Rocheteau A., Arnal D., Bouvery F., Kergoat L., Timouk F., Grippa M., Gangneron F., Badiane Ndour Y., Chapuis-Lardy L., Seghieri J., Masse D., Fleury L., Delaunay P., Montes N., Vezy R., Le Maire G., Rajot J.L., Pierre C., Vallée M., Leroy

- N. & Chotte J.L. (2019). "Faidherbia-Flux", an open observatory for GHG balance and C stocks in a semi-arid agro-sylvo-pastoral system (Senegal). 4th World Congress on Agroforestry. . France, 20-22 of May 2019. Le Corum Conference Centre, Montpellier, France. Poster. Session 1: Mitigating Climate change with agroforestry. Poster.
- Roupsard O., Joly H. & Dreyer E. (1996). Écophysiologie de *Faidherbia albida* : fonctionnement hydrique en parc agroforestier et variabilité intraspécifique de caractéristiques juvéniles. *In Cirad (éd)*, Nogent-sur-Marne, 85-102.
- Roupsard O. (1997). Écophysiologie et diversité génétique de *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. (syn. *Acacia albida* Del.), un arbre à usages multiples d'Afrique semi-aride. 207.
- Roupsard O., Audebert A., Ndour A.P., Clermont-Dauphin C., Agbohessou Y., Sanou J., Koala J., Faye E., Leroux L., Sambakhe D., Jourdan C., Le Maire G., Seghieri J. & Cournac L. (2020). How far does the tree affect the crop in agroforestry? new spatial analysis methods in a *Faidherbia* parkland. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 15. Accepted 16 of March 2020.
- Roupsard O., Joly H.I. & Dreyer E. (1998). Variability of initial growth, water use efficiency and carbon isotope discrimination in seedlings of *Faidherbia Albida* (Del.) A. Chev., a multipurpose tree of semi-arid africa. Provenance and Drought Effects. *Annales Des Sciences Forestières* **55** (3): 329-348. Consulté le site <https://doi.org/10.1051/forest:19980305>.
- Sileshi G.W. (2016). The magnitude and spatial extent of influence of *Faidherbia albida* trees on soil proprieties and primary productivity in drylands. *J. Arid Environ* **132** : 1-14.
- Smektala G., Peltier R., Sibelet N., Leroy M., Manlay R., Njiti C.F., Ntoupka M., Njiemoun A., Palou O. & Tapsou. (2005). Parcs agroforestiers sahéliens : de la conservation à l'aménagement . *Vertigo*, **6** (2). <https://doi.org/10.4000/vertigo.4410>.
- Tateishi M., Kumagai T., Utsumi Y., Umebayashi T., Shiiba Y., Inoue K., Kaji K., Cho K. & Otsuki K. (2008). Spatial variations in xylem sap flux density in evergreen oak trees with radial porous wood : comparisons with anatomical observations. *Tree Physiology*, **22** : 23-30.
- Tsuruta K., Komatsu H., Kume T., Otsuki K., Kosugi Y. & Kosug K. (2019). Relationship between stem diameter and transpiration for JAPANESE cypress trees : implications for estimating canopy transpiration. *Ecohydrology* **12** (5). Disponible sur <https://doi.org/10.1002/eco.2097>.

- Valancogne C. & Granier A. (1991). Intérêt des méthodes thermiques de mesure de flux de sève pour l'étude du bilan hydrique des savanes. Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). *IAHS Publ.* **199** : 387-400.
- Vandegheuchte M.W. & Steppe K. (2013). Sap flux density measurement methods : working principles and applicability. *Functional Plant Biology* **40** (3) : 213. Disponible sur le site <https://doi.org/10.1071/FP12233>.
- Vandenbeldt R.J., International Crops Research Institute for the Semi-arid Tropics & International Centre for Research in Agroforestry. (1992). *Faidherbia Albida* in the west african semi-arid tropics : proceedings of a workshop. International Centre for Research in Agroforestry. 22-26p.
- Wei Z., Yoshimura K., Diego W.L., Miralles G., Jasechko S. & Lee X. (2017). Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration : revisiting global et partitioning. *Geophysical Research Letters*, **44** (6) : 2792-2801. <https://doi.org/10.1002/2016GL072235>.
- Wickens G.E. (1969). A Study of *Acacia Albida* Del. (Mimosoideae). *Kew Bull* **23** (2) : 181-202.
- Wood P.J. & Centre Technique Forestier Tropical. (1989). *Faidherbia Albida* (Del.) A. Chev. (Synonyme: *Acacia Albida* Del.): A monograph. Nogent-sur-Marne.