



***Sujet : Les variations de la  
transpiration de la strate ligneuse en  
environnement soudano-guinéen***

**Mémoire pour l'obtention du master en  
ingénierie de l'eau et de l'environnement,  
option : eau**

Présenté et soutenu le 22 juin 2010 par

Magali SERVIERE

Travaux dirigés par :

**Josiane SEGHIERI**, chargée de recherche IRD, MSE Montpellier  
**Christophe PEUGEOT**, chargé de recherche IRD, MSE Montpellier  
**Hamma YACOUBA**, chef d'unité GVEA (Gestion et Valorisation  
de l'Eau-Assainissement)

## **REMERCIEMENTS**

Je remercie beaucoup mes tuteurs de stage : Josiane Seghieri et Christophe Peugeot, chargés de recherche à l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), MSE Montpellier pour m'avoir proposé ce stage de Master 2 à la MSE Montpellier (Maison des Science de l'Eau) et pour leur grande disponibilité ainsi que leurs conseils tout au long du stage, malgré leurs autres travaux.

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

- Alain Rocheteau, Ingénieur d'étude au CEFÉ (Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive) (Montpellier) pour l'aide technique apportée à l'étude des données de flux de sève.
- Maxime Wubda et Jules Sogba-Goh à Cotonou pour la mise à disposition des données de flux de sève.
- Pierre Agbani, thésard au laboratoire d'Écologie Appliquée, université d'Abomey-Calavi (Bénin) pour la mise à disposition des données de phénologie.
- Sylvie Galle, chargée de recherche IRD du laboratoire LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement) (Grenoble) pour la mise à disposition des données météorologiques, d'humidité du sol et de directions des vents.
- Luc Séguis, chargé de recherche à l'IRD, MSE, (Montpellier) pour la mise à disposition des données de piézométrie.
- Marielle Gosset, chargée de recherche IRD au LTHE, (Grenoble) pour la mise à disposition des données de pluviométrie.

Je remercie aussi toutes les personnes qui sont passées par le bureau n°130 et particulièrement les stagiaires : Mabrouk Abaza, Clémentine Clergue, Benjamin Nguyen et les thésards : Bill Issoufou et Malick Zorome pour leurs conseils et leur contribution à la bonne ambiance générale du bureau.

Je remercie finalement ma famille pour leurs soutien et leurs conseils.

## RESUME

Les variations de la transpiration de la strate ligneuse en environnement soudano-guinéen (précipitation annuelle de 1000 à 1400 mm) ont été étudiées au Nord du Bénin, dans le bassin versant de la Donga, sur deux types de surface : une forêt sèche classée et une savane arbustive, de Novembre 2008 to Avril 2010. La transpiration de l'espèce ligneuse dominante sur chaque type de surface : *Isoberlinia doka* et *Vitellaria paradoxa* est suivie automatiquement par la méthode de Granier de mesure du flux de sève. Un bilan de fonctionnement des capteurs de mesure du flux de sève, installés sur chaque type de couvert, a été au préalable réalisé. Les résultats de cette étude montrent que la densité de flux de sève (DFS) des deux espèces ligneuses est constante (moyenne glissante sur 5 jours variant de 14 à 30 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>) toute l'année sauf pendant les périodes de défeuillaison et de mise en feuille, ce qui fait de la phénologie foliaire, le principal facteur responsable des variations saisonnières de la transpiration. A l'échelle journalière, les facteurs limitants de la DFS sont : le rayonnement net (Rnet) journalier et le déficit de saturation de l'air maximale journalier (VPDmax). Nous avons cherché à caractériser la relation non linéaire entre la DFS et le Rnet journalier d'une part, et entre la DFS et le VPDmax d'autre part. A l'intérieur d'une journée, le Rnet et la DFS sont influencés par l'occurrence de la pluie. Les ressources en eau (pluie journalière, stock en eau du sol des couches 0-30cm et 0-100cm et profondeur de la nappe) ne semblent pas avoir d'influence sur la DFS au niveau saisonnier mais un traitement statistique poussé et l'étude de l'humidité du sol jusqu'à un maximum de 9 m permettrait de valider l'hypothèse émise.

### Mots Clés :

---

- 1 – Transpiration ligneuse**
- 2 – Flux de sève**
- 3 – *Isoberlinia doka***
- 4 – *Vitellaria paradoxa* / arbre à karité**
- 5 – Climat soudano-guinéen**

## ABSTRACT

Variations in the transpiration of the woody stratum in a Sudano-Guinean bioclimatic site (annual rainfall of 1000 to 1400 mm) were studied in the Donga watershed, in northern Benin, on two types of vegetation cover: a protected dry forest and a shrub savannah, from November 2008 to April 2010. The transpiration of the dominant woody species on each type of vegetation cover: *Isoberlinia doka* and *Vitellaria paradoxa* was monitored automatically by the Granier's method of measuring sap flow. An operational assessment of sap flow sensors, installed on each type of vegetation cover, has previously been done. Results of this study show that *Isoberlinia doka* and *Vitellaria paradoxa* transpire readily over the whole year (the moving average over a 5-day period for the sap flow density ranging from 14 to 30 l.dm<sup>-2</sup>.day<sup>-1</sup>) except during periods of defoliation and leaf development, which makes the leaf phenology, the main factor for seasonal pattern of tree transpiration. At the daily scale, the limiting factors of density sap flow density (SFD) are: daily net radiation (Rnet) and maximum daily vapour pressure deficit (VPDmax). We sought to characterize the nonlinear relationship between SFD and the daily Rnet on one hand, and between the SFD and the VPDmax on the other hand. Within a day, Rnet and VPD are influenced by the occurrence of rain. Water resources (daily rainfall, soil water storage in layers 0-30cm and 0-100cm and depth of the groundwater) seem to have no influence on seasonal pattern of SFD but an advanced statistical treatment and a study of soil moisture to a maximum of 9 m depth would validate the hypothesis.

### Key words :

---

**1 – Tree transpiration**

**2 – Sap flow**

**3 – *Isoberlinia doka***

**4 – *Vitellaria paradoxa* / shea butter tree**

**5 – Sudano-guinean climate**

## **LISTES DES ABREVIATIONS**

ACP : Analyse en Composantes Principales

AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

CEFE : Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive

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

DFS : Densité de Flux de Sève

Eto : Évapotranspiration de référence

FAO : Food and Agriculture Organization

HSM : HydroSciences Montpellier

HV : Humidité Volumique

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

LTHE : Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement

MSE : Maison des Sciences de l'Eau

Rnet : Rayonnement net

TDR : Time Domain Reflectometry

TU : Temps Universel

VPD : Déficit de saturation de l'air (Vapour Pressure Deficit)

2ie: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

## **SOMMAIRE**

REMERCIEMENTS .....	2
RESUME .....	3
ABSTRACT .....	4
LISTES DES ABREVIATIONS .....	5
SOMMAIRE .....	6
LISTES DES FIGURES .....	8
LISTE DES TABLEAUX .....	9
I. INTRODUCTION.....	10
I.1 Contexte de l'étude .....	10
I.2 État de l'art sur la transpiration ligneuse .....	11
II. OBJECTIFS DU TRAVAIL .....	13
III. MATERIELS ET METHODES .....	14
III.1 Le site d'étude.....	14
III.1.1 Description des stations .....	15
III.1.2 Description des espèces ligneuses instrumentées .....	16
III.2 Mesure des flux de sève .....	18
III.2.1. Technique utilisée .....	18
III.2.2. Mise en œuvre .....	20
III.2.3 Traitement des données .....	23
III.3 Observations sur la phénologie.....	24
III.3.1 Protocole d'observation.....	24
III.3.2 Traitement des données .....	24
III.4 Les facteurs physiques.....	25
III.4.1 Les Paramètres météorologiques.....	25
III.4.2 Humidité du sol.....	26
III.4.3 Profondeur de la nappe .....	27
IV. RESULTATS .....	28
IV.1 Bilan de fonctionnement des capteurs de flux de sève .....	28
IV.2 Variations saisonnières de la densité de flux de sève .....	29
IV.2.1 Description des variations saisonnières de la densité de flux de sève .....	29
IV.2.2 Identification des facteurs déterminants de la variation saisonnières de la densité de flux de sève.....	33
IV.2.2.1 le facteur biologique .....	33

IV.2.2.2 les facteurs physiques .....	35
IV.3 Variations journalières de la densité de flux de sève .....	43
V. DISCUSSION .....	49
V.1 Estimations de la transpiration ligneuse à l'échelle saisonnière et journalière.....	49
V.2 les facteurs influents sur la densité de flux de sève .....	49
V.3 Les limites de notre étude .....	51
VI. CONCLUSION .....	52
VII. PERSPECTIVES .....	53
VIII. BIBLIOGRAPHIE.....	55
IX. ANNEXES .....	58
.....	74

## LISTES DES FIGURES

Figure 1 : localisation géographique du bassin versant de la Donga .....	14
Figure 2 : Diagramme ombrothermique du site de Bira (année 2009).....	16
Figure 3 : Photographies des espèces instrumentées.....	17
Figure 4 : Disposition des deux sondes de mesure de la température servant à l'estimation du flux de sève sur un arbre.....	18
Figure 5 : Principe de fonctionnement de Granier (1985) d'estimation du flux de sève à l'échelle de l'arbre.....	19
Figure 6 : Cartographie des instruments de mesure mis en place sur la station de Béléfoungou .....	20
Figure 7 : cartographie du site de Bira .....	21
Figure 8 : Relation surface de bois d'aubier en fonction du DBH et géométrie utilisée dans l'estimation de la surface de bois d'aubier des coupes.....	23
Figure 9 : Variations des paramètres mesurés et observés sur le site de Béléfoungou de novembre 2008 à avril 2009 .....	31
Figure 10 : Variations des paramètres mesurés et observés sur le site de Bira de novembre 2008 à avril 2009.....	32
Figure 11 : Allure de la relation entre la DSF et le stade phénologique de feuillaison.....	34
Figure 12 : Cercle de corrélation des variables réalisé avec les données mesurées à la station Béléfoungou.....	37
Figure 13 : Cercle de corrélation des variables réalisé avec les données mesurées à la station Bira pendant la période de pleine feuillaison des arbres K1 et K3. ....	38
Figure 14 : Variations de la DFS du capteur I-55-5 (l.dm-2.j-1) en fonction des paramètres physiques .....	42
Figure 15 : Régressions entre la DFS (l.dm-2.j-1) des capteurs I-55-5, I-37-5, K-32-5 et K-37-5, pendant la période de pleine feuillaison et les variables : Rnet (MJ.m-2) et VPDmax (kPa).....	45
Figure 16 : Graphiques des variations journalières de la DFS des capteurs I-55-5 et I-37-5, du rayonnement net (Rnet) et du déficit de saturation de l'air (VPD) sur 5 jours.....	47

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dénomination des capteurs mis en place sur <i>Isoberlinia doka</i> et caractéristiques des arbres instrumentés.....	21
Tableau 2 : Dénomination des capteurs de flux de sève mis en place sur des <i>Vitellaria paradoxa</i> et caractéristiques des arbres instrumentés.....	22
Tableau 3 : Surface de bois d'aubier des arbres instrumentés de <i>Vitellaria paradoxa</i> .....	23
Tableau 4 : Description de la transformation des stades observés en indice de feuillaison .....	25
Tableau 5 : plage de données de DFS exploitable sur <i>Isoberlinia doka</i> et <i>Vitellaria paradoxa</i> .....	28
Tableau 6 : plage de données de la DFS et de la phénologie exploitables .....	33
Tableau 7 : Contributions des axes à l'ACP1 réalisée avec les données mesurées à la station Béléfoungou. ....	37
Tableau 8 : Contributions des axes à l'ACP réalisée avec les données mesurées à la station Bira pendant la période de pleine feuillaison des arbres K1 et K3. ....	38
Tableau 10 : Résultats de la régression de DFS en fonction des paramètres physiques : le Rnet (MJ.m <sup>-2</sup> ) et le VPDmax (kPa).....	44

## **I. INTRODUCTION**

### **I.1 Contexte de l'étude**

L'estimation de la transpiration de la végétation ligneuse est encore très peu abordée dans les milieux tropicaux, en particulier en environnement soudano-guinéen. La transpiration joue pourtant un rôle hydrogéologique important (Lubczynski, 2009). Les prélèvements d'eau de la végétation ligneuse dans la zone non saturée comme dans la nappe doivent être pris en considération dans les modèles hydrologiques pour pouvoir boucler les bilans d'eau.

Par ailleurs, les différents modèles hydrologiques et de Transferts Sol-Végétation-Atmosphère (SVAT) produisent pour une situation donnée, une large gamme de valeurs de l'évapotranspiration (Guyot et al., 2009). Ces modèles ont donc besoin d'être validés par des mesures de l'évapotranspiration réelle. Or la contribution de transpiration de la strate ligneuse à l'évapotranspiration est en général significative : du fait des prélèvements de l'eau en profondeur, par rapport à la strate herbacée dont le système souterrain est plus superficiel et plus dense, et de son activité presque permanente tout au long de l'année (Soubie, 2008). Considérer la transpiration ligneuse comme contributeur majeur à l'évapotranspiration est donc pertinent, particulièrement en saison sèche, pendant laquelle la présence du couvert d'herbacé est négligeable ou non nulle (Blanchard et al., 2007). Pour les études en hydrologie ou en météorologie, l'estimation de l'évapotranspiration d'une surface se fait grâce à des techniques de mesures automatiques locales de flux turbulents, comme celles par eddycorrélacion ou de scintillométrie, mais le problème reste la distinction de la part des différents éléments de la surface contribuant à ce processus (Soubie, 2008). D'autre part, 30 à 70% des précipitations (dépendant des saisons) retourne dans l'atmosphère à travers l'évapotranspiration (Guyot et al., 2009), ce qui fait de la mesure de l'évapotranspiration, un élément déterminant dans la compréhension de la Mousson Africaine de l'Ouest. De plus, les transformations de la couverture ligneuse sont rapides dans le bioclimat soudano-guinéen, en particulier au nord du Bénin, à cause des défrichements pour une extension des cultures. Celle-ci répond aux besoins croissants d'une population dont la démographie augmente de plus en plus vite. La question se pose donc déjà concernant les modifications que ce défrichement entraîne sur le bilan hydrique et le recyclage de l'eau vers l'atmosphère.

La technique de mesure de flux de sève a été choisie comme mesure de la transpiration ligneuse car cette technique est simple et fiable. Elle utilise peu d'énergie et s'adapte bien à une étude spatiale de la transpiration. Ces mesures concernent les deux espèces ligneuses majoritaires de deux types de couvert représentatifs de la zone soudanienne au nord du Bénin : *Isobertinia doka* dans une forêt claire et *Vitellaria paradoxa* dans une jachère arbustive. Cette étude va nous permettre de déterminer les variations saisonnières et journalières de la transpiration ligneuse ainsi que les facteurs les plus influents sur ce processus. De plus, la mesure de la transpiration constitue un élément essentiel de la compréhension de la physiologie de l'arbre et de la dynamique des transferts d'eau dans les peuplements forestiers (Granier, 1985). Elle nous renseigne par exemple sur les stratégies d'adaptation de l'arbre au stress hydrique.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme de recherche international AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine)<sup>1</sup> dont le but est d'améliorer les connaissances sur la mousson ouest-africaine et son impact hydrologique.

## **I.2 État de l'art sur la transpiration ligneuse**

La transpiration ligneuse peut être définie comme la perte en eau des arbres sous forme de vapeur d'eau. Plus de 90% de cette vapeur d'eau s'échappe par les feuilles, par l'intermédiaire de petits pores nommés stomates, par où se font les échanges gazeux avec l'extérieur (Hopkins et al., 2003). L'ouverture des stomates est sous le double contrôle de la lumière et de l'état hydrique du système sol-plante. La présence de lumière agit sur le métabolisme des cellules stomatiques, ce qui entraîne l'ouverture des stomates alors que l'absence ou la diminution de lumière entraîne la fermeture des stomates. Le déficit hydrique provoqué par une diminution de l'humidité du sol ou un air trop sec entraîne la fermeture des stomates. La transpiration stomatique varie suivant l'ouverture et la fermeture des stomates. (Heller et al., 1998). L'atmosphère qui entoure les feuilles n'est habituellement pas saturée en eau : un déficit de saturation de l'air existe. Dans ces conditions, il se crée un gradient entre un potentiel hydrique faible de l'atmosphère extérieure et un potentiel hydrique élevé à l'intérieur de la feuille. Ce gradient est le moteur de la transpiration. La sève brute est une solution composée d'eau et de minéraux du sol qui circule dans les vaisseaux de bois, appelé xylem (regroupés dans la zone du bois d'aubier du tronc) depuis le sol où elle est peu retenue (faible potentiel hydrique), vers les feuilles où elle est plus retenue (fort potentiel hydrique).

---

<sup>1</sup>Site internet d'AMMA : [www.amma-international.org](http://www.amma-international.org)

Ce mouvement peut être décrit par une équation de transfert où le flux de sève est d'autant plus fort que la différence de potentiel hydrique est grande, et que la résistance au transfert est faible (Hopkins et al., 2003).

Les environnements limités en eau sont ceux où le rapport entre les précipitations annuelles et l'évapotranspiration est inférieur à 0,75. Ils comprennent les régions arides, semi-arides et quelques régions subhumides. Dans ces environnements, un stress hydrique des plantes, se produit typiquement pendant les longues saisons sèches. Ce stress hydrique induit des mécanismes d'adaptation à la sécheresse, comme la variabilité de la transpiration des arbres en fonction des saisons ou une plus grande efficacité de l'utilisation de l'eau (Lubczynski, 2009). Une adaptation particulière est la présence de racines latérales en surface et de racines pivotantes en profondeur, allant parfois jusqu'à la nappe phréatique. Les espèces ligneuses qui prélèvent l'eau des nappes phréatiques sont appelées phréatophytes. Ces espèces ligneuses possèdent des racines très profondes comme *Boscia albitrunca* et *Acacia erioloba*, qui varient de 8 à plus de 70 m de profondeur pour atteindre la nappe phréatique dans le désert du Kalahari au Botswana. Ce système leur permet d'être indépendantes de la pluie et des ressources en eau, contenues dans les premières couches du sol (Obakeng, 2007). Les études de Do et al., (1998) faites au nord du Sénégal en zone sahélienne, ont indiqué qu'*Acacia tortilis var raddiana* a accès à la nappe phréatique à 31m de profondeur. Un mécanisme de redistribution hydraulique utilisé par certaines espèces la nuit, peut parfois permettre le transfert d'eau des couches basses relativement humides vers les couches en surface plus sèches, par l'intermédiaire des racines pivotantes qui alimentent en eau les racines latérales de l'arbre. Il a été mis en évidence dans une savane parc d'Afrique de l'Ouest (Burkina Faso), sur des *Vitellaria paradoxa* (appelé karité en français) et des *Parkia biglobosa* (appelé néré en français). L'étude montre que ces espèces redistribuent la nuit, dans la zone étudiée, respectivement 60% et 53% de la quantité transpirée par jour (Bayala, 2008).

Une étude faite par Granier (1996) sur une forêt tropicale de Parakou, en Guyane française, où la densité des arbres est importante (215 et 225 arbres/ha), montre que la densité de flux de sève dépend du développement de la couronne de l'arbre. Dans cet environnement, la transpiration ligneuse serait plus influencée par le déficit de saturation de l'air que par le rayonnement global.

## **II. OBJECTIFS DU TRAVAIL**

L'objectif général du travail proposé ici, est d'estimer les variations spatiales et temporelles de la transpiration de la strate ligneuse en environnement soudano-guinéen. Cette étude porte sur deux types de couvert correspondant à deux niveaux d'intensité d'exploitation (jachère et forêt), et concerne l'analyse des variations saisonnières et journalières de la transpiration des espèces dominantes respectivement. Un bilan de fonctionnement des capteurs de mesure de flux de sève installés sur chaque type de couvert sera au préalable réalisé. Les facteurs environnementaux les plus déterminants seront ensuite identifiés parmi la phénologie foliaire, le rayonnement net, le déficit de saturation de l'air, la pluviométrie, l'humidité du sol et la profondeur de la nappe.

### III. MATERIELS ET METHODES

#### III.1 Le site d'étude

L'étude se déroule sur le site principal du programme de recherche AMMA au Nord Ouest du Bénin : le bassin versant de la Donga (Figure 1). Ce bassin versant est situé entre les parallèles 9°40' et 9°54'N et les méridiens 1°34' et 1°58' E, dans le département du même nom, dont le chef lieu est Djougou. C'est un sous-bassin de l'Ouémé qui s'étend sur une superficie de 586 km<sup>2</sup>. Le climat est du type tropical sec avec une saison sèche et une saison des pluies. Cette zone est classée par Aubreville comme soudano-guinéenne (1000 à 1400 mm par an). L'activité socio-économique, hormis la ville de Djougou (20 000 ha) est essentiellement rurale et basée sur des cultures pluviales et l'élevage. L'essentiel des ressources en eau à usage domestique provient d'une multitude de puits villageois et de forages, disséminés sur l'ensemble du bassin (Kamagaté et al., 2007).

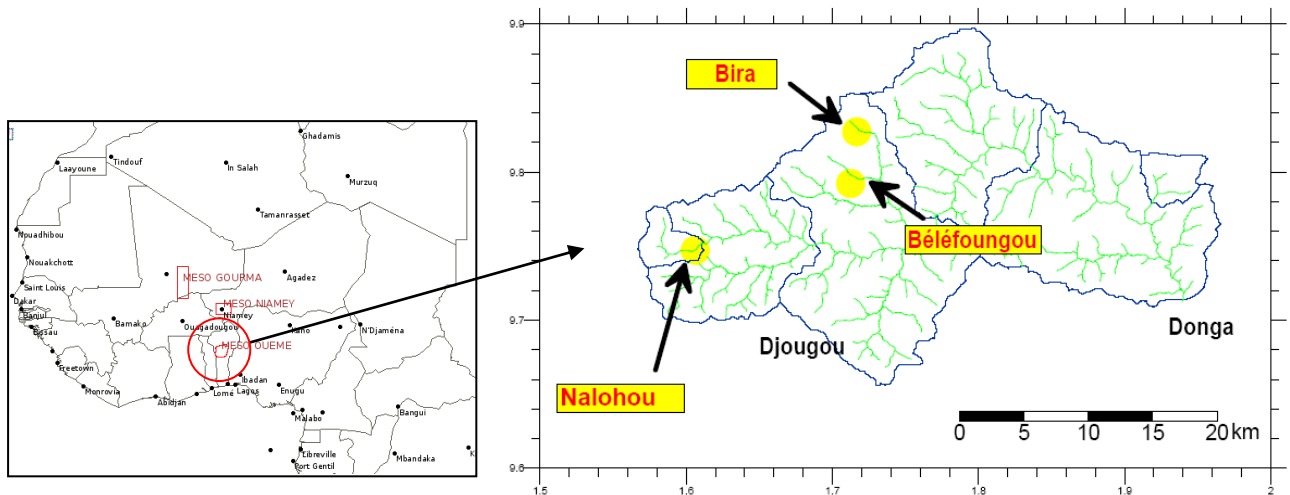


Figure 1 : localisation géographique du bassin versant de la Donga

### III.1.1 Description des stations

Les 2 stations étudiées sont situées sur deux types de couverts végétaux représentatifs de la majorité des surfaces non cultivées de la zone d'étude. Il s'agit de :

#### La forêt classée de Béléfoungou

C'est une forêt claire résultant de la dégradation d'une forêt à Légumineuses : ces formations occupaient autrefois des étendues considérables sous le climat soudano-guinéen d'après Aubréville (1949). Les espèces ligneuses dominantes sont *Isoberlinia doka* et *Isoberlinia tormentuosa*. *Isoberlinia doka* contribuent à 43 % de la densité du couvert végétal de la strate supérieure à 12 m et de la strate inférieure à 6 m de hauteur. *Isoberlinia tormentuosa* contribuent à 28 % de la densité du couvert végétal de la strate supérieure à 12 m de haut et de la strate inférieure à 6 m de haut. Chacune de ces 2 espèces contribue à 9 % de la densité du couvert végétal de la strate comprise entre 6 et 12 m. L'espèce ligneuse co-dominante est *Pterocarpus erinaceus* contribuent à 11 % de la densité du couvert végétal de la strate inférieure à 6 m de hauteur, à 7 % de celle de la strate comprise entre 6 et 12 m de haut, à 15% de celle de la strate supérieure à 12 m (Blanchard et al., 2007).

#### La savane arbustive de Bira-Bira

C'est une jeune jachère composée de graminées pérennes et d'arbres conservés volontairement par les agriculteurs pour leurs apports économiques. Cette station a été instrumentée en 2005 et les relevés sur la végétation ont commencé en 2006. Les 2 espèces ligneuses dominantes sont *Vitellaria paradoxa* et *Combretum collinum*. *Vitellaria paradoxa* contribue à 55% de la densité du couvert végétale pour les arbres supérieurs à 12 m de haut et pour 50% de celle des arbres dont la hauteur est comprise entre 6 et 12 m. *Combretum collinum* contribue à 25% de la densité du couvert des arbres de taille inférieure à 6 m. La pression anthropique actuelle s'y exerce par du pâturage et le prélèvement de bois de chauffe. (Blanchard et al, 2007).

La saison des pluies s'étend d'avril à octobre et la saison sèche de novembre à mars sur les 2 sites (Figure 2). La pluviométrie annuelle est du même ordre de grandeur entre les stations, en terme de quantité et de répartition mensuelle. La pluviométrie est de 1233 mm en

2008 et de 1624 mm en 2009 pour la station de Béléfoungou, et de 1293 mm en 2008 et de 1577 mm en 2009 pour la station de Bira.

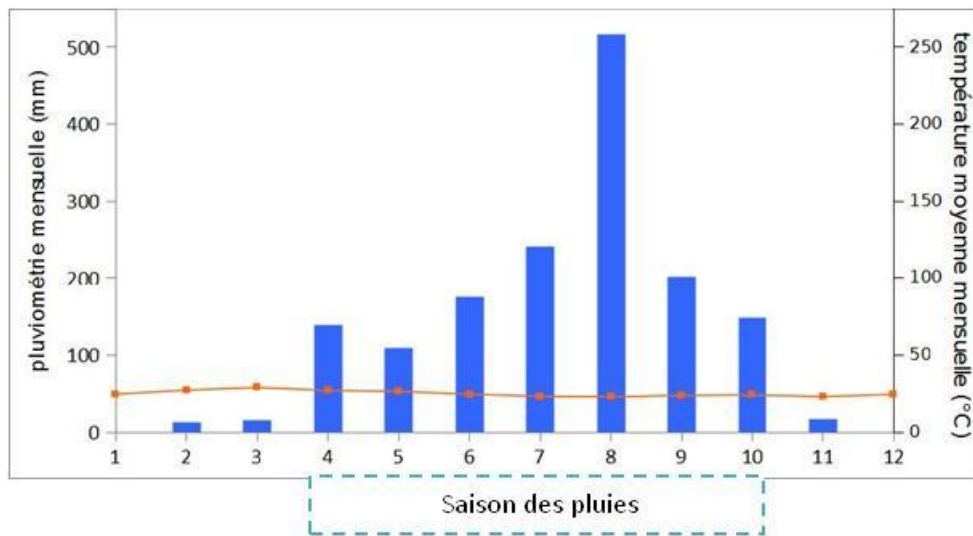


Figure 2 : Diagramme ombrothermique du site de Bira (année 2009)

### III.1.2 Description des espèces ligneuses instrumentées

Les espèces ligneuses instrumentées par des capteurs de flux de sève font partie les espèces dominantes dans chacune des stations :

#### *Isoberlinia doka* (Figure 3)

C'est l'espèce instrumentée sur le site de Béléfoungou. De la famille des Césalpiniacées, elle est semi-caducifoliée. Les arbres possèdent une cime assez étroite et ouverte allant jusqu'à plus de 12m de haut, à tronc court (3-5m) et souvent creux atteignant 60 cm de diamètre. Les feuilles sont alternes, paripennées, plus ou moins cireuses et brillantes et vert foncé sur les deux faces. Cette espèce occupe les savanes soudaniennes et guinéennes. Elle pousse sur les sols argileux et bien drainés et sur les sols médiocres. Elle se répartie de la Guinée au Cameroun jusqu'au Soudan. Très commune, elle est souvent grégaire quand elle forme des forêts claires (Arbonnier, 2002).

🌳 *Vitellaria paradoxa* (le karité) (Figure 3)

C'est l'espèce instrumentée sur le site de Bira. De la famille des Sapotacées, elle est semi-caducifoliée. Les arbres possèdent une cime d'allure sphérique, dense, fortement branchue et ramifiée allant jusqu'à plus de 12 m de haut et un fût généralement court (2-3m) et noueux. Les feuilles sont alternes, ordinairement un peu ondulées et rassemblées à l'extrémité des branches. Cette espèce occupe les savanes soudaniennes et guinéennes et pousse sur tous les types de sol, sauf les sols inondés. Elle est répartie de l'est du Sénégal au Cameroun et jusqu'au Soudan. Elle peut être très abondante localement (Arbonnier, 2002). Dans les savanes parcs, les agriculteurs protègent les arbres du karité car ils produisent des fruits valorisés économiquement. Les agriculteurs cultivent des céréales entre et sous ces arbres (Bayala et al., 2008).



(a)



(b)

Figure 3 : Photographies des espèces instrumentées

(a) : *Isoberlinia doka*

(b) : *Vitellaria paradoxa*

## III.2 Mesure des flux de sève

### III.2.1. Technique utilisée

La mesure de flux de sève se fait à l'échelle de l'arbre selon le dispositif à dissipation thermique de Granier (1985). Le dispositif expérimental est constitué de deux sondes de mesure de la température insérées dans l'aubier de l'arbre, à 1,3 m du sol et séparées verticalement de 4 cm (Figure 4). Chaque sonde contient un thermocouple cuivre-constantan. Ces deux thermocouples sont montés en opposition afin de mesurer l'écart de température entre les deux sondes. La sonde la plus en aval du flux de sève, au dessus de l'autre sonde, est équipée d'une résistance (aluminium) chauffée à une puissance constante. L'autre sonde montée en opposition n'est pas chauffée et sert de référence pour la température de l'arbre. Le fonctionnement du dispositif est le suivant (Figure 5) :

- En l'absence de flux (la nuit), un écart de température maximum  $\Delta T_0$  s'établit entre les deux sondes.
- Lorsqu'il y a un flux (le jour), une partie de la chaleur dégagée par l'élément chauffant, est évacuée par convection dans la sève; un écart de température  $\Delta T$  s'établit, qui dépend de la densité de flux de sève au voisinage des deux sondes.

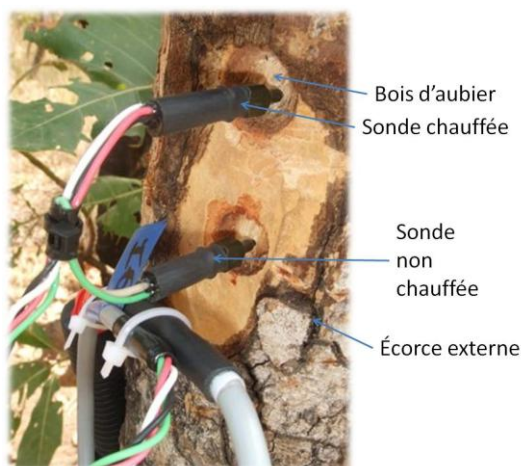


Figure 4 : Disposition des deux sondes de mesure de la température servant à l'estimation du flux de sève sur un arbre

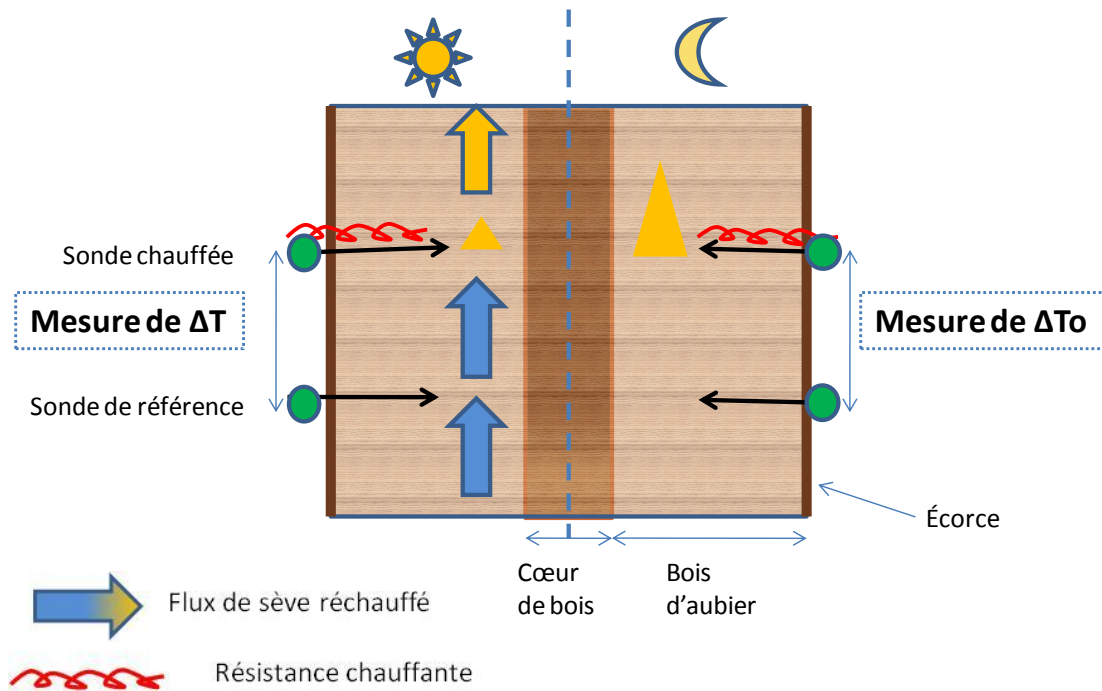


Figure 5 : Principe de fonctionnement de Granier (1985) d'estimation du flux de sève à l'échelle de l'arbre

Les différences de température  $\Delta T$  sont mesurées toutes les 5min puis moyennées sur la demi-heure précédente.

A partir des différences de température entre les deux sondes, on calcule l'index de flux  $K$  pour chaque demi-heure, proportionnel à la densité de flux de sève (DFS) :

$$K = \frac{\Delta T_0 - \Delta T}{\Delta T} \quad \text{Équation 1}$$

$\Delta T$  : Différence de température en présence de flux de sève

$\Delta T_0$  : Différence de température maximale mesurée entre 20:00 du jour  $j-1$  et 07:30 du jour  $j$ , en prenant pour hypothèse que l'arbre ne transpire pas la nuit.

La densité de flux de sève DFS (en  $\text{l} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) est proportionnelle à l'index  $K$ , et cette relation d'après Granier (1985) est valable pour toutes les espèces ligneuses.

$$DFS = 4,284 \times K^{1,231} \quad \text{Équation 2}$$

On en déduit ensuite le flux de sève  $J$  (en  $\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$ ) pour l'ensemble de l'arbre, grâce à une estimation de la surface de bois d'aubier  $A$  (en  $\text{dm}^2$ ).

$$J = DFS \times A \quad \text{Équation 3}$$

### III.2.2. Mise en œuvre

Un échantillonnage des deux espèces étudiées a permis d'établir la répartition (en pourcentage) des arbres par classe de diamètres des troncs à 1,3m du sol (DBH), sur chaque station. On a alors sélectionné 8 arbres par station, représentatifs des classes de diamètres majoritaire, au sein du peuplement de chaque espèce. Ces arbres sont instrumentés par un ou deux capteurs de flux de sève (Tableaux 1 et 2). Les données sont enregistrées grâce à une centrale d'acquisition (CAMPBELL). Les capteurs de flux de sève ont été fournis par DYNAMAX (Houston, Texas, USA). Ils ont été installés en perçant deux trous d'une profondeur fonction de la longueur de la sonde et de l'épaisseur moyenne de l'écorce à traverser pour atteindre le bois d'aubier. L'épaisseur du bois d'aubier varie également selon les espèces et selon l'âge des individus. C'est pourquoi, on a choisi d'installer une sonde de 1 cm et une sonde de 5 cm de long sur les deux arbres qui ont le plus grands DBH sur chaque station et seulement une sonde de 1 cm de long pour les autres arbres (Tableaux 1 et 2).

Les figures 6 et 7 montrent la répartition des arbres instrumentalisés dans la forêt de Béléfoungou et dans la savane de Bira par rapport aux mesures physiques (station de mesure de l'humidité du sol, piézomètre et sonde neutronique) du programme de recherche AMMA.

#### 🌳 Répartition des arbres échantillonnés dans la forêt de Béléfoungou

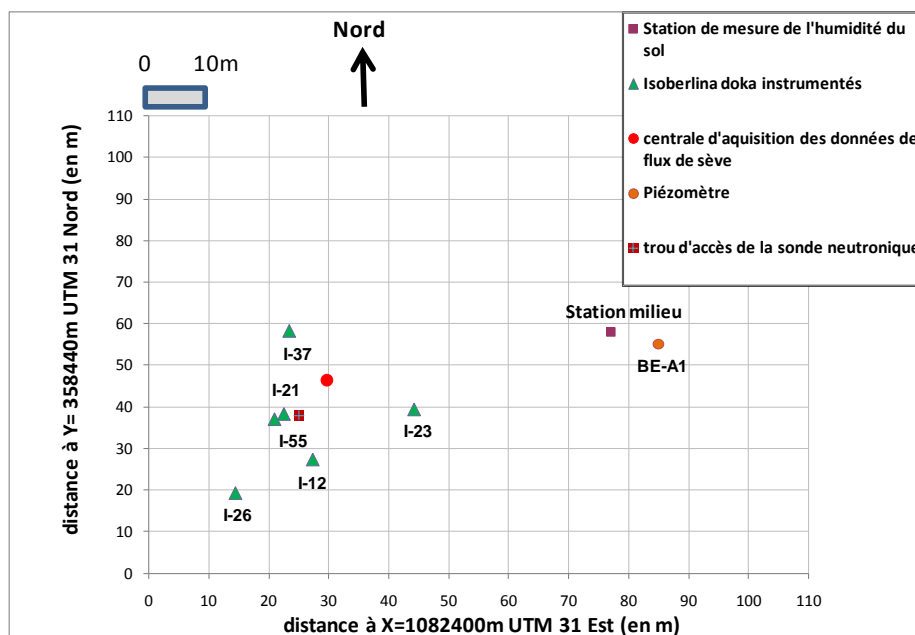


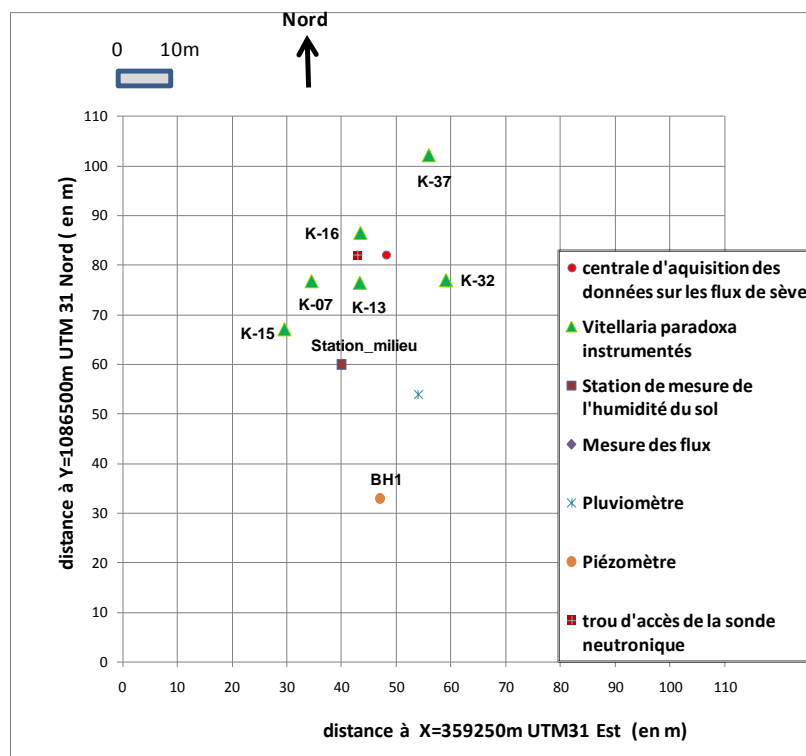
Figure 6 : Cartographie des instruments de mesure mis en place sur la station de Béléfoungou

Les capteurs de flux de sève, sur la station de Béléfoungou, ont été dénommés de la façon suivante : la première lettre : I pour *Isoberlinia doka* correspond à l'espèce instrumentée, le premier nombre correspond au DBH de l'arbre et le deuxième nombre (1 ou 5) correspond à la longueur de la sonde : 1 cm ou 5 cm.

**Tableau 1 : Dénomination des capteurs mis en place sur *Isoberlinia doka* et caractéristiques des arbres instrumentés**

N° arbre	I1		I2		I3	I4	I5	I6
Nom du capteur	I-55-1	I-55-5	I-37-1	I-37-5	I-21-1	I-23-1	I-26-1	I-12-1
DBH (cm)	55		37		21	23	26	12
Taille de l'aiguille (cm)	1	5	1	5	1	1	1	1
Profondeur d'insertion (cm)	1,7		1,5		1,3	1,2	1,5	1

### 🌳 Répartition des arbres échantillonnés dans la savane de Bira



**Figure 7 : cartographie du site de Bira**

Les capteurs de flux de sève, sur la station de Bira, ont été dénommés de la façon suivante : la première lettre K pour Karité correspond au nom commun de l'espèce *Vitellaria paradoxa*, le premier nombre correspond au DBH de l'arbre et le deuxième nombre (1 ou 5) correspond à la longueur de la sonde : 1 cm ou 5 cm.

**Tableau 2 : Dénomination des capteurs de flux de sève mis en place sur des *Vitellaria paradoxa* et caractéristiques des arbres instrumentés**

N° arbre	K1		K2	K3		K4	K5	K6
Nom du capteur	K-32-1	K-32-5	K-13-1	K-37-1	K-37-5	K-16-1	K-15-1	K-07-1
DBH (cm)	32		13	37		16	15	7
Taille de l'aiguille (cm)	1	5	1	1	5	1	1	1
Profondeur d'insertion (cm)	1,8		1	2,2		1,4	1	2,2

### Calcul du flux de sève à l'échelle de l'arbre

Le calcul du flux de sève à l'échelle de l'arbre nécessite d'établir une relation DBH-Surface de bois d'aubier pour chaque espèce ligneuse étudiée. Cette relation a été établie sur *Vitellaria paradoxa* (Figure 8 et Tableau 3) mais reste à faire sur *Isobertinia doka*. Pour établir cette relation une vingtaine d'arbres de taille petite à moyenne (DBH maximal de 22 cm) ont été coupés. Le DBH de chaque coupe a été mesurée. En assimilant la section du tronc de l'arbre à une ellipse (Figure 8), les épaisseurs (e1, e2 et e3) du bois d'aubier ainsi que le demi-grand axe b et le demi-petit axe a (l'axe b est perpendiculaire à l'axe a) du cœur de bois (bois mort) ont été mesurés visuellement sur chaque coupe. En effet le bois d'aubier est de couleur crème et le cœur de bois est de couleur acajou.

La surface de bois d'aubier A est estimée de la façon suivante :

$$A = S_{(\text{cœur} + \text{aubier})} - S_{\text{cœur}} \quad \text{Équation 4}$$

Avec :  $S_{\text{cœur}} = (\pi \times a \times b)/4$

Et  $S_{(\text{cœur} + \text{aubier})} = (\pi \times (2 \times e_{\text{aubier moyen}} + a) \times (2 \times e_{\text{aubier moyen}} + b))/4$

La relation DBH-Surface de bois d'aubier suivante a été établie pour *Vitellaria paradoxa*.

$$A = 0,1395 \times DBH^2 + 1,9483 \times DBH \text{ avec } R^2=0,8317 \text{ et } n=20 \text{ points} \quad \text{Équation 5}$$

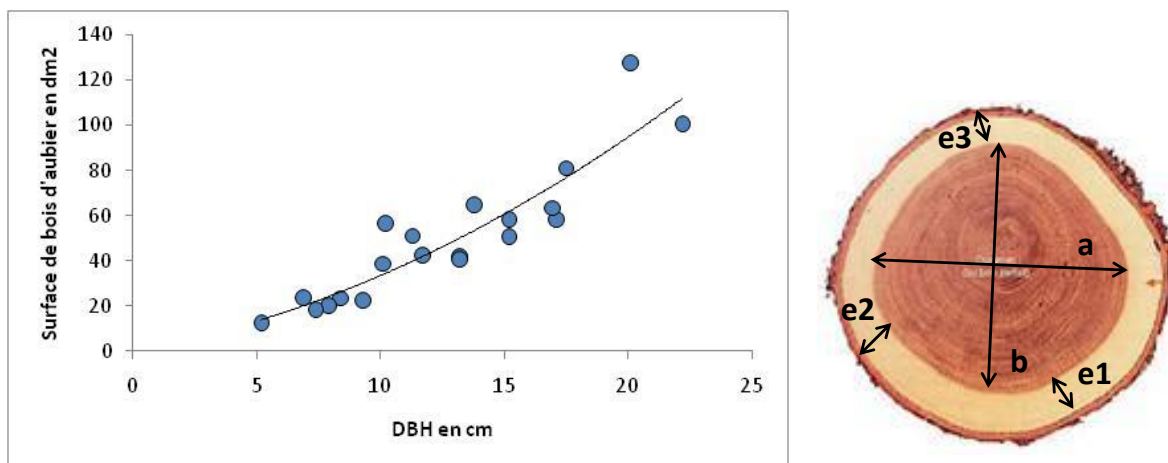


Figure 8 : Relation surface de bois d’aubier en fonction du DBH et géométrie utilisée dans l’estimation de la surface de bois d’aubier des coupes

Les surfaces de bois d’aubier sont déduites de l’équation 5 (Tableau 3). Les surfaces de bois d’aubier des individus K1 (DBH = 32 cm) et K3 (DBH = 37 cm) ont été estimées en extrapolant l’équation aux DBH supérieurs à 22cm.

Tableau 3 : Surface de bois d’aubier des arbres instrumentés de *Vitellaria paradoxa*

N° arbre	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Surface bois d'aubier (cm2)	205,2	48,9	263,1	66,9	60,6	20,5

### III.2.3 Traitement des données

On calcule d’abord K à chaque demi-heure puis la DFS à chaque demi-heure. La DFS journalière est calculée en intégrant les valeurs de la DFS entre 00:30 du jour j et 00:00 du jour j+1. On trace une courbe de la DFS journalière en fonction du temps pour mettre en évidence les variations saisonnières. Ces courbes sont analysées en relations avec les facteurs environnementaux (phénologie et facteurs physiques). Une Analyse en Composante Principale (ACP) comportant les données de la DFS de chaque capteur pour les deux stations, ainsi que les paramètres physiques est réalisée. La DFS journalière est ensuite tracée en fonction des facteurs environnementaux. Une régression a été également faite pour les facteurs environnementaux présentant un lien fort avec la DFS journalière. Enfin, on trace une courbe de la DFS en fonction du temps au pas de temps 30 minutes pour mettre en évidence les variations de la DFS à l’intérieur d’une journée.

### **III.3 Observations sur la phénologie**

#### **III.3.1 Protocole d'observation**

Les observations des phases de feuillaison sont faites tous les mois en période de saison sèche ou des pluies, et toutes les deux semaines au cours des périodes de transition. La méthode utilisée est celle proposée par Grouzis et Sicot, (1980).

Chaque phase est subdivisée en 6 stades qui correspondent au développement suivant :

- Stade 0 : pas de feuilles du tout
- Stade 1 : gonflement des bourgeons, pas de feuilles développées ou moins de 10% des feuilles de la canopée épanouies.
- Stade 2 : bourgeons foliaires encore visibles et entre 10 et 50 % des feuilles de l'individu épanouies.
- Stade 3 : plus de 50 % des feuilles de l'individu épanouies.
- Stade 4 : feuilles vertes encore visibles et/ou entre 10 et 50 % des feuilles de la canopée sèches ou ayant changé de couleur.
- Stade 5 : plus de 50 % des feuilles de la canopée sont sèches et chute des feuilles observable; c'est le stade le plus difficile à noter car certains individus peuvent garder leurs feuilles sèches en place relativement longtemps.

#### **III.3.2 Traitement des données**

On note que les stades 1 et 2 décrivent la mise en feuille et que les stades 4 et 5 décrivent la défeuillaison. Afin d'identifier rapidement les périodes pendant lesquelles l'indice de feuillaison est minimal sur les phénogrammes, les stades phénologiques 1 et 5 et 2 et 4 ont été regroupés en indice de feuillaison (Tableau 4). On trace une courbe de l'indice de feuillaison en fonction du temps sur le graphique comportant la courbe de la DFS en fonction du temps. Cette méthode a également été utilisée par Do et al. (2008).

Dans l'ACP et les graphiques mettant en évidence la relation entre la DFS et les facteurs physiques, les données de stades phénologiques seront utilisées pour différencier les valeurs de la DFS en phase de « pleine feuillaison » (stade 3) où plus de 50% des feuilles de l'arbre sont épanouies et en phase de « mise en feuille ou défeuillaison » (stades 0, 1, 2, 4 ou 5) où moins de 50% des feuilles de l'arbre sont épanouies.

Tableau 4 : Description de la transformation des stades observés en indice de feuillaison

Indice de feuillaison	Stades observés regroupés
0	0
1	1 et 5
2	2 et 4
3	3

### III.4 Les facteurs physiques

Les données physiques proviennent des dispositifs de mesures physiques de chaque station du programme AMMA, les plus proches des dispositifs de flux de sève (voir Figure 6 et 7).

#### III.4.1 Les Paramètres météorologiques

##### Protocole de mesures

- La pluie est mesurée par le pluviographe à auget de la station de Béléfoungou et de Bira. La précision d'enregistrement est de 1/10mm.
- Les paramètres atmosphériques sont mesurés automatiquement au niveau des stations de mesures des flux par eddy-corrélation de Béléfoungou et de Bira\_haut.

##### Traitement des données

Un traitement préalable des données a permis le calcul des paramètres suivants :

Le rayonnement net  $R_{net}$  (en  $W/m^2$ ) représente l'énergie radiative disponible à la surface. Le  $R_{net}$  est calculé par la formule suivante :

$$R_{net} = (SW_{in} + LW_{in}) - (SW_{out} + LW_{out}) \quad \text{Équation 6}$$

Avec : -  $SW_{in}$  = rayonnement incident de courtes longueurs ondes en  $W/m^2$

-  $SW_{out}$  = rayonnement réfléchi de courtes longueurs d'ondes en  $W/m^2$

-  $LW_{in}$  = rayonnement incident de grandes longueurs d'ondes en  $W/m^2$

- LWout = rayonnement réfléchi de courtes longueurs ondes en W/m<sup>2</sup>

L'Évapotranspiration de référence Eto (en mm/j) caractérise la demande atmosphérique. C'est l'évapotranspiration qu'aurait un gazon parfaitement irrigué dans les mêmes conditions climatiques. Elle est calculée par la formule FAO Penman-Monteith à partir de : la température (T), de l'humidité de l'air (HR), du rayonnement net (Rnet), de la densité de flux de chaleur sensible (G) et de la vitesse du vent (Allen et al., 1998).

La pression de vapeur saturante  $e_s(T)$  en kPa s'obtient par la formule de Tetens :

$$e_s(T) = 0,6108 \times \exp \left[ \frac{17,27 \times T}{T + 237,3} \right] \quad \text{Équation 7}$$

Avec T = température de l'air en °C

Le déficit de saturation de l'air (VPD) est la quantité potentielle de vapeur d'eau que l'air pourrait contenir à un instant donné avant d'être saturé. Il se calcule de la façon suivante :

$$VPD(T, HR) = e_s \times \left( 1 - \frac{HR}{100} \right) \quad \text{Equations 8}$$

Avec :  $e_s$  = pression de vapeur saturante à la température de l'air T en kPa

HR = humidité relative de l'air en %

Les paramètres climatiques à l'échelle de la journée, sont estimés comme suit :

- les valeurs de Pluie et de Rnet sont cumulées sur la journée
- On considère le maximum journalier du VPD appelé VPDmax
- les valeurs diurnes d'Eto sont cumulées sur la journée entre 5h et 19h quelle que soit la saison, car l'heure de lever et de coucher du soleil varie peu au Bénin au cours de l'année, étant donné que ce pays est proche de l'équateur.

### III.4.2 Humidité du sol

Les données d'humidité du sol proviennent des stations appelées Bira\_Milieu et Béléfougou\_Haut. Sur chacune de ces stations, les capteurs (CAMPBELL CS616) sont situés à 6 profondeurs : 5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 60 cm et 100cm. Ce dispositif fournit les variations horaires de l'humidité volumique (en pourcentage) du sol par sonde capacitive ou TDR (Time Domain Reflectometry). On calcule la moyenne journalière de l'humidité

volumique  $HVi$  des couches  $i$  de sol suivantes : 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm et 60-100 cm à partir de l'humidité volumique à chaque profondeur de capteur.

A partir des moyennes journalières de  $HVi$ , les stocks journaliers en eau pour la couche de sol : 0-30 cm et 0-100 cm sont calculés par la formule suivante :

$$\sum_{i=1}^n e_i \times HVi \quad \text{Equations 9}$$

Avec :  $e_i$  = épaisseur de la couche  $i$  de sol

$HVi$  = humidité volumique (en pourcentage) de la couche  $i$  de sol

### **III.4.3 Profondeur de la nappe**

La profondeur de la nappe est relevée tous les deux jours dans le piézomètre appelé BH1, à Bira et BE-A1 à Béléfoungou. La profondeur du fond du tube est de 6,23 m pour BH1 et de 19,83 m pour BE-A1. Nous avons procédé à une interpolation linéaire entre les valeurs disponibles de piézométrie lors du traitement des données par ACP et lorsque l'on a tracé la DFS en fonction de la profondeur de la nappe, car les variations de piézométrie sont assez lentes.

## IV. RESULTATS

### IV.1 Bilan de fonctionnement des capteurs de flux de sève

Le détail du bilan de fonctionnement des capteurs sur la période de novembre 2008 à avril 2010 est développé en Annexe 1. Les capteurs ont été identifiés comme fonctionnels s'ils enregistrent encore des données et si le  $\Delta T_o$  ne dérive pas dans le temps. Cependant, certains capteurs composés de sondes de 1cm de long montrent des valeurs de  $\Delta T_o$  qui ne dérivent pas dans le temps mais des valeurs de la DSF qui à partir d'une certaine date diminuent, et restent relativement faibles sur toute la période des mesures. Par précaution, nous exploiterons seulement les données des capteurs dont les valeurs enregistrées en début de l'année 2009 sont du même ordre de grandeur que celles enregistrées au début de l'année 2010. Cependant, l'identification des capteurs non fonctionnels ne sera confirmée qu'après un examen visuel lors de la prochaine mission sur le terrain. En effet, lors du dernier examen des capteurs en juillet 2009, les capteurs : I-55-5, I-37-5, I-21-1 et I-26-1 ont été repérés comme étant rejetés par l'arbre. Les sondes du capteurs n'étant plus insérées totalement dans le bois d'aubier, la DFS calculée serait incorrecte. Depuis cet examen, il est possible que ce type de réaction de l'arbre à l'introduction d'un capteur se soit répété sur d'autres capteurs .

A partir de ces critères, les plages de données identifiées comme fiables et utilisées dans la suite de l'étude sont listées dans le tableau 5.

Tableau 5 : plage de données de DFS exploitable sur *Isobertinia doka* et *Vitellaria paradoxa*

<i>Isobertinia doka</i>			<i>Vitellaria paradoxa</i>		
N° arbre	Nom du capteur	Plage exploitables	N° arbre	Nom du capteur	Plage exploitables
11	I-55-1	aucunes données exploitables	K1	K-32-1	aucunes données exploitables
	I-55-5	du 23/11/08 au 16/02/10		K-32-5	du 23/11/08 au 27/11/09
12	I-37-1	aucunes données exploitables	K2	K-13-1	aucunes données exploitables
	I-37-5	du 23/11/08 au 16/04/10	K3	K-37-1	du 23/11/08 au 27/01/09
13	I-21-1	aucunes données exploitables		K-37-5	du 23/11/08 au 16/04/10
14	I-23-1	du 23/11/08 au 09/04/09	K4	K-16-1	aucunes données exploitables
15	I-26-1	aucunes données exploitables	K5	K-15-1	du 23/11/08 au 4/03/09
16	I-12-1	du 23/11/08 au 21/04/09	K6	K-07-1	du 23/11/08 au 29/03/09

## IV.2 Variations saisonnières de la densité de flux de sève

### IV.2.1 Description des variations saisonnières de la densité de flux de sève

Les capteurs I-55-5 et I-37-5 sur *Isoberlinia doka*, et K-32-5 et K-37-5 sur *Vitellaria paradoxa*, ont été choisis pour l'étude des variations saisonnières de la DFS car ce sont les seuls capteurs dont les données ont été considérées comme exploitables sur l'ensemble de la période de mesure. Les variations saisonnières de la densité de flux de sève journalière pour la station de Béléfoungou sont représentées sur la Figure 9c qui correspond au capteur I-55-5 et sur la Figure 9d qui correspond au capteur I-37-5. Les variations saisonnières de la densité de flux de sève journalière pour la station de Bira sont représentées sur la Figure 10c qui correspond au capteur K-32-5 et sur la Figure 10d qui correspond au capteur K-37-5. On distingue 3 périodes sur ces graphiques :

1. Une période entre novembre et février où la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS journalière varie jusqu'à atteindre un minimum local. Pendant cette période, les valeurs minimales de la moyenne glissantes sur 5 jours de la DFS journalières sont les suivantes : pour l'espèce *Isoberlinia doka*, la DFS minimale enregistrée par le capteur I-55-5 est de  $3 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$ , et la DFS minimale enregistrée par le capteur I-37-5 est de  $12 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$ , pour l'espèce *Vitellaria paradoxa*, la DFS minimale enregistrée par le capteur K-32-5 est de  $9 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$  et la DFS minimale enregistrée par le capteur K-37-5 est de  $3 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$ .
2. Une période entre février et mars où la moyenne glissante sur 5 jours de la DSF est constante à une valeur plus élevée que les valeurs de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS de la période 1. Pendant cette période, les valeurs de la moyenne glissantes sur 5 jours de la DFS journalières sont les suivantes : pour l'espèce *Isoberlinia doka*, la DFS enregistrée par le capteur I-55-5 varie entre 23 et  $29 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$ , et la DFS enregistrée par le capteur I-37-5 varie entre 19 et  $23 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$ , pour l'espèce *Vitellaria paradoxa*, la DFS enregistrée par le capteur K-32-5 varie entre 21 et  $25 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$  et la DFS enregistrée par le capteur K-37-5 varie entre 21 et  $25 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$ .
3. Une période entre avril et octobre où la moyenne glissante sur 5 jours de la DSF est constante à une valeur similaires à celle de la période 2. Pendant la période 3, les valeurs de la moyenne glissantes sur 5 jours de la DFS journalières sont les suivantes :

pour l'espèce *Vitellaria paradoxa*, la DFS varie entre 14 et 30  $\text{l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$  pour un DBH de 32 cm et entre 15 et 25  $\text{l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$  pour un DBH de 37cm, pour l'espèce *Isoberlinia doka*, la DFS varie entre 19 et 30  $\text{l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$  pour un DBH de 55cm et entre 14 et 28  $\text{l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$  pour un DBH de 37cm. La différence avec la période 2 provient des valeurs de la DFS qui varient fortement d'un jour à l'autre.

Grâce à la relation DBH-surface de bois d'aubier (équation 5), on estime que *Vitellaria paradoxa*, pendant la période 3, possède un flux de sève variant entre 40 et 66  $\text{l.j}^{-1}$  pour un DBH de 37 cm et un flux de sève variant entre 29 et 62  $\text{l.j}^{-1}$  pour un DBH de 32 cm.

On remarque que la période 1 correspond à la saison sèche, que la période 2 correspond à la période de transition entre la saison sèche et la saison des pluies et que la période 3 correspond à la saison des pluies. Une variation de la DFS saisonnière est donc mise en évidence, la partie suivante va chercher à identifier les facteurs explicatifs.

Les variations de la transpiration de la strate ligneuse en environnement soudano-guinéen

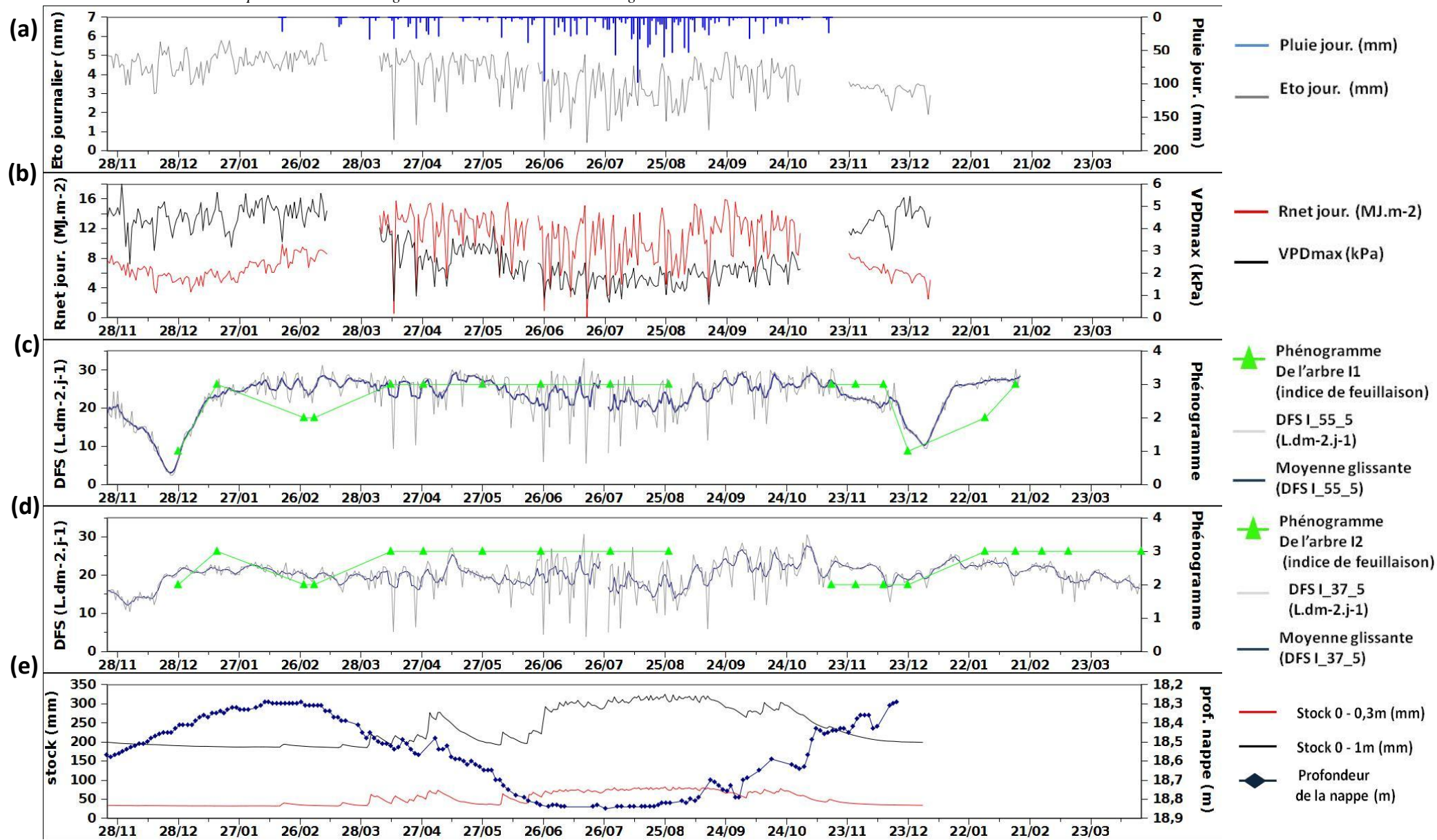


Figure 9 : Variations des paramètres mesurés et observés sur le site de Béléfoungou de novembre 2008 à avril 2009

Pluie journalière (mm) et Eto journalière (mm) (a) Rnet (MJ.m-2.j-1) et VPD (kPa) (b) Densité de Flux de Sève (DFS) de I-55-5 (L.dm-2.j-1), moyenne glissante de DFS du capteur I-55-5 et Phénogramme (indice de feuillaison) (c) Densité de Flux de Sève de I-37-5 (L.dm-2.j-1), moyenne glissante de DFS I-37-5 et Phénogramme (d) Stock d'eau : 0 - 0,3 m (mm), Stock d'eau : 0-1m (mm) et profondeur de la nappe (m) (e)

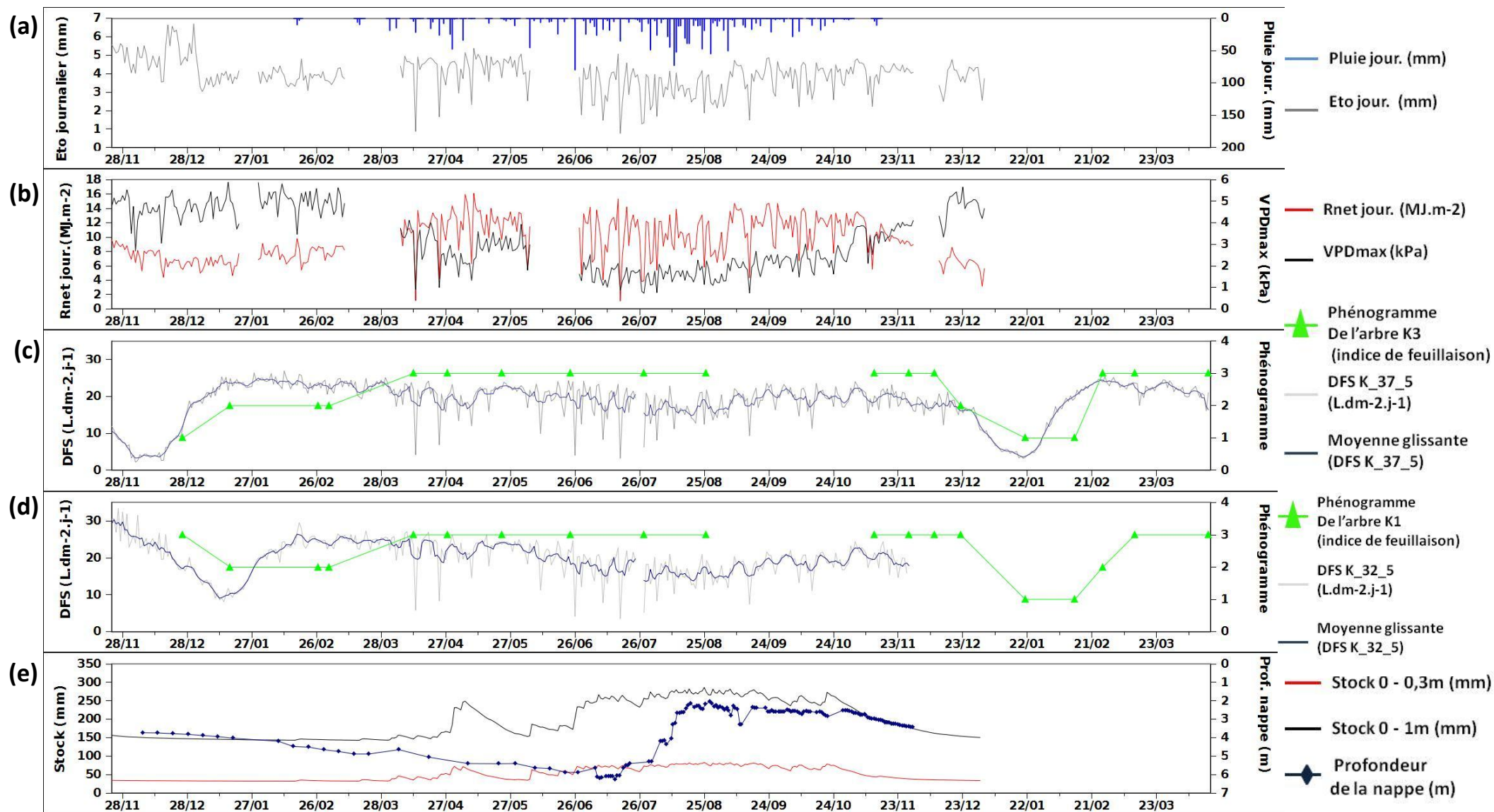


Figure 10 : Variations des paramètres mesurés et observés sur le site de Bira de novembre 2008 à avril 2009

Pluie journalière (mm) et Eto journalière (mm) (a) Rnet journalier (MJ.m-2.j-1) et VPD (kPa) (b) DFS du capteur K-37-5 (L.dm-2.j-1), moyenne glissante sur 5j de DFS K-37-5 et Phénogramme (indice de feuillaison) (c) DFS du capteur K-32-5 (L.dm-2.j-1), moyenne glissante sur 5j de DFS K-32-5 et Phénogramme (indice de feuillaison), (d) Stock d'eau : 0-0,3 m (mm), Stock d'eau : 0-1m (mm) et profondeur de la nappe (m) (e)

## IV.2.2 Identification des facteurs déterminants de la variation saisonnières de la densité de flux de sève

### IV.2.2.1 le facteur biologique

Les Figures 9c, 9d et 10c, 9d montrent que les valeurs de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS journalière varient en général en même temps que l'indice de feuillaison. La figure 10c, montre cependant que pendant la période 1, pour le capteur K-37-5, la DFS augmente puis diminue plus rapidement que l'indice de feuillaison.

L'indice de feuillaison ne comportant pas toute l'information contenue dans les stades phénologiques, nous allons chercher à préciser l'allure de la relation entre la DFS et les stades phénologiques de feuillaison, qui sont les données non transformées. Les données utilisées sont l'ensemble des données de la DFS et de la phénologie exploitables (Tableau 6). Les valeurs de la DFS des capteurs I-23-1, I-12-1, K-15-1 et K-07-1 ont été ajoutées aux valeurs des capteurs I-55-5, I-37-5, K-37-5 et K-32-5 car bien qu'elles soient seulement exploitables sur une courte période, elles peuvent nous permettre d'émettre des hypothèses sur le comportement des arbres de petit DBH, qui ne pourront être validées qu'avec un plus grand nombre de valeurs.

Tableau 6 : plage de données de la DFS et de la phénologie exploitables

Espèce	Nom capteur	Plage de données exploitables	
		début	fin
<i>Isoberlinia doka</i>	I-55-5	28/12/2008	14/02/2010
	I-37-5	28/12/2008	17/04/2010
	I-23-1	28/12/2008	05/03/2009
	I-12-1	28/12/2008	05/03/2009
<i>Vitellaria paradoxa</i>	K-37-2	26/12/2008	16/04/2010
	K-32-5	26/12/2008	12/11/2009
	K-15-1	26/12/2008	04/03/2009
	K-07-1	26/12/2008	04/03/2009

On observe sur les 2 espèces *Isoberlinia doka* et *Vitellaria paradoxa*, que l'allure du nuage de points est la suivante : DFS augmente avec le stade phénologique pour les stades de

0 à 3 et que la DFS diminue avec le stade phénologique pour les stades de 3 à 5 (Figures 11a et 11b). Au stade 3, les valeurs de la DFS du capteur I-55-5 sont supérieures à celles des 3 autres capteurs (capteur I-37-5, capteur I-23-1 et capteur I-12-1) tandis que les valeurs des capteurs K-32-5 et K-37-5 sont du même ordre de grandeur. On remarque que tous les points correspondant aux valeurs de la DFS du capteur I-12-1, 2 points correspondant aux capteurs K-15-1 et 1 points correspondant au capteur K-37-5 et K-32-5 (voir points encadrés en rouge sur la Figure 12a) sont atypiques car leur DFS est inférieure à celles des autres points

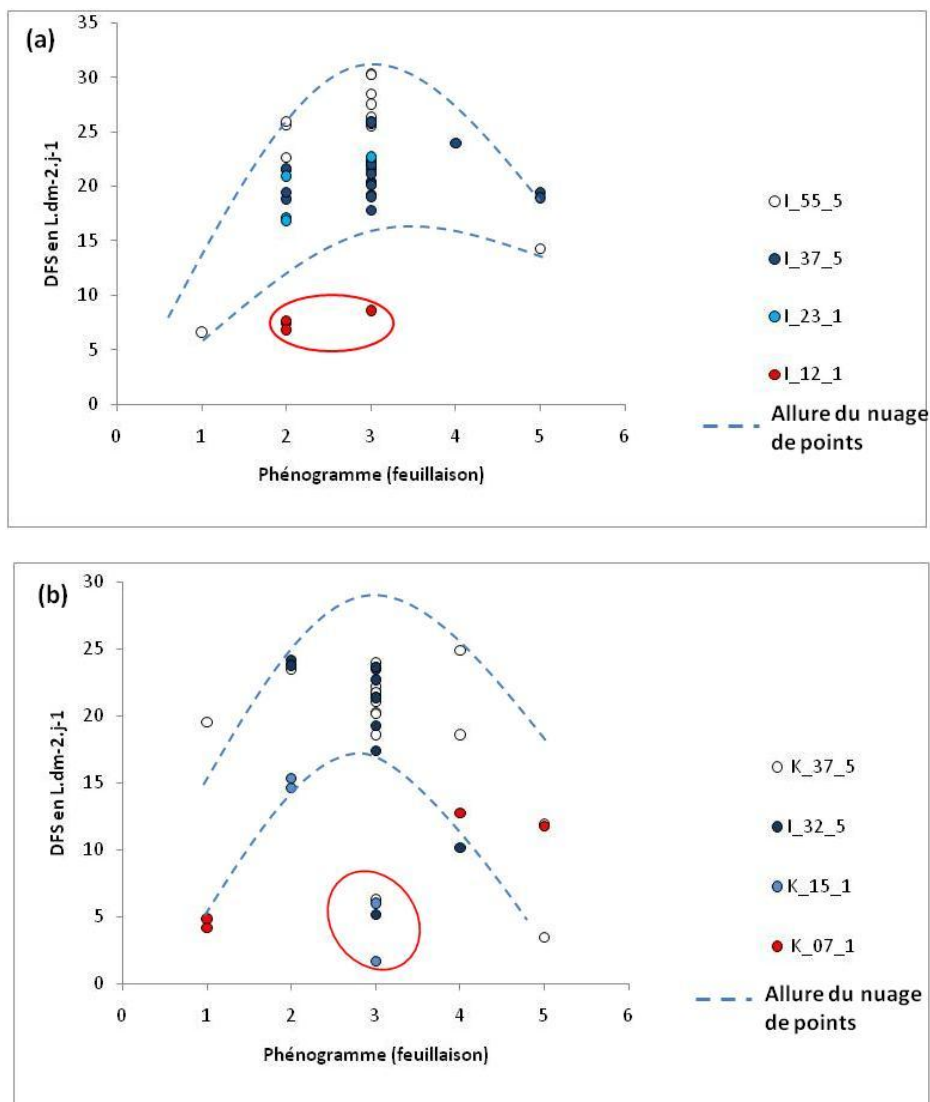


Figure 11 : Allure de la relation entre la DSF et le stade phénologique de feuillaison

(a) : pour les 4 *Isoberlinia doka* portant les capteurs I\_55\_5, I\_37\_5, I\_23\_1 et I\_12\_1

(b) : pour les 4 *Vitellaria Paradoxa* portant les capteurs K\_32\_5, K\_37\_5, K\_15\_1 et K\_07\_1

### **IV.2.2.2 les facteurs physiques**

Il y a beaucoup de données manquantes dans les variables météorologiques entre le 23/11/08 et le 31/12/09. Les données de profondeur de la nappe sont mesurées entre le 23/11/08 et le 17/12/09 sur la station de Béléfoungou et entre le 7/12/08 au 31/12/09 sur la station de Bira.

#### **🌿 Analyse en composante principale**

Deux ACP sont réalisées par station : l'ACP1 réalisée à partir des données mesurées pendant la période du 23/11/08 à 17/12/09 (Tableau 7 et Figure 12) pour la station de Béléfoungou et pendant la période du 7/12/08 au 31/12/09 pour la station de Bira (en Annexe 2) et l'ACP2 réalisée à partir des données mesurées pendant la pleine feuillaison des arbres instrumentés, incluse dans la période précédente (Tableau 8 et Figure 13 pour la station de Bira, et en Annexe 3 pour la station de Béléfoungou).

L'ACP1 réalisée sur la station de Béléfoungou explique 79% de la variance des données avec les axes 1 et 2 (contribution respectives des axes de 50 et 29%) et l'ACP1 réalisée sur la station de Bira explique 79% de la variance avec les axes 1, 2 et 3 (contribution respectives des axes de 43, 24 et 12%). Sur les deux stations, les deux premiers axes sont formés à partir des mêmes variables à l'exception de la profondeur de la nappe (Tableau 7 et Annexe 3).

- L'axe 1 est formé par plus de 80% de la variance des variables VPDmax, Stock 0-30 cm, et Stock 0-100 cm mesurées à chaque station, avec une contribution de la profondeur de la nappe pour les données de Béléfoungou.
- L'axe 2 est formé par plus de 50% de la variance des variables Rnet journalier et DFS pour les deux capteurs de chaque station.
- L'axe 3 est formé par plus de 70% de la variance de la profondeur de la nappe pour les données de la station de Béléfoungou.

Le cercle de corrélation des variables montre des groupements similaires entre les deux stations (Figure 12 et Annexe 2). Sur le cercle, un premier groupe est formé par la DFS des deux capteurs et le Rnet journalier et un deuxième groupe est formé par le stock 0-30cm et le stock 0-100cm, qui inclus la profondeur de la nappe seulement sur la station de Béléfougou. Le cercle de corrélation montre que la DFS des deux capteurs est corrélée positivement avec le Rnet et que le VPDmax est corrélé négativement avec le stock 0-30cm, le stock 0-100cm et la profondeur de nappe. La pluviométrie n'est pas corrélée aux autres variables car elle est située près du centre du cercle.

L'ACP2 réalisée à partir des données de la station de Béléfougou explique 81% de la variance des données avec les axes 1 et 2 (contribution respectives des axes de 51 et 57%) (Annexe 3) et l'ACP2 réalisée à partir des données de la station de Bira explique 73% de la variance avec les axes 1 et 2 (contribution respectives des axes de 51 et 22%) (Tableau 8). L'ACP 2 réalisée à partir des données de la station de Béléfougou est similaire à l'ACP1 : les axes de l'ACP2 sont décrits par les mêmes variables que celles qui décrivent l'ACP1, le regroupement des variables est le même ainsi que le sens de corrélation des variables entre elles. L'ACP2 réalisée avec les données de la station de Bira est différente de l'ACP1, les axes de l'ACP2 sont décrits par des variables différentes de celles qui décrivent les axes de l'ACP1. L'axe 1 est formé par plus de 74% de la variance de la variable VPDmax, par plus de 55% du stock 0-30 cm et du stock 0-100 cm et par plus de 66% de la DFS des deux capteurs. L'axe 2 est formé par 45% de la variance de Rnet journalier. L'ACP2 montre un regroupement des variables : VPDmax, DFS des deux capteurs et Rnet journalier (Figure 13).

Les ACP1 et ACP2 réalisées avec les variables mesurées sur la station de Béléfougou montrent que la DFS des deux capteurs est corrélée avec le Rnet journalier. L'ACP1 réalisée avec les variables mesurées sur la station de Bira montrent que la DFS des deux capteurs est corrélée avec le Rnet journalier. Lorsque les données utilisées sont celles mesurées pendant la pleine feuillaison des arbres K1 et K3, l'ACP2 montre que la DFS des deux capteurs est corrélé au VPDmax et au Rnet.

Tableau 7 : Contributions des axes à l'ACP1 réalisée avec les données mesurées à la station Béléfoungou.

	Axe 1		Axe 2	
	Corrélation de la variable à l'axe	Contribution de la variable à l'axe en %	Corrélation de la variable à l'axe	Contribution de la variable à l'axe en %
VPDmax	-0,9189	84%	0,1959	4%
Rnet journalier	0,5108	26%	0,7429	55%
Pluie journalière	0,4231	18%	-0,4679	22%
DFS I-55-5	0,239	6%	0,8551	73%
DFS I-37-5	0,0065	0%	0,8864	79%
Stock 0-100cm	0,9379	88%	-0,0666	0%
Stock 0-30cm	0,962	93%	-0,0502	0%
Profondeur de la nappe	0,9082	82%	-0,1111	1%
% de la variance totale expliquée par l'axe (% cumulé)	3,9714	50% (50%)	2,3455	29% (79%)

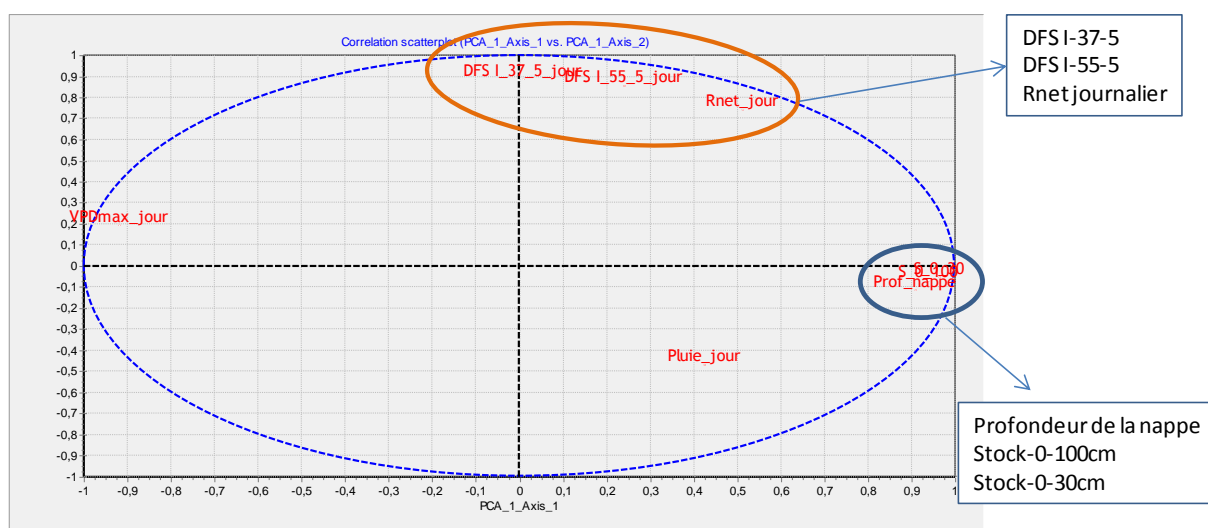
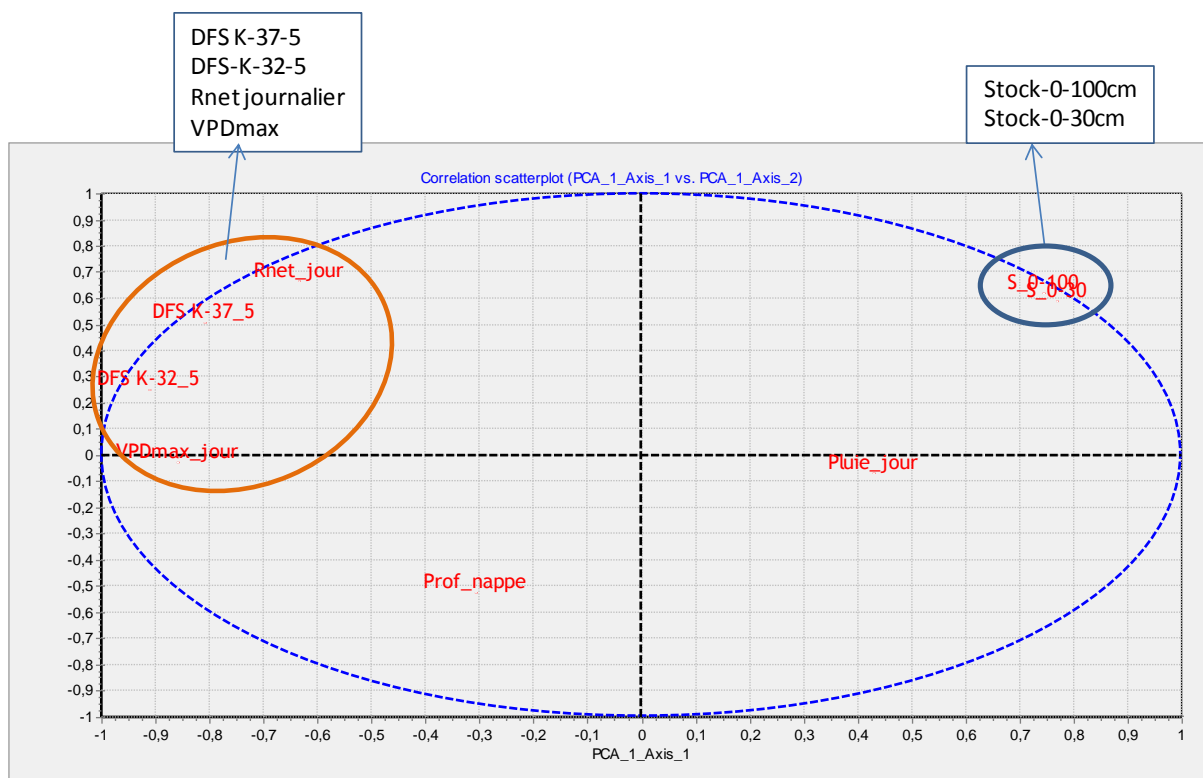


Figure 12 : Cercle de corrélation des variables réalisé avec les données mesurées à la station Béléfoungou.

**Tableau 8 : Contributions des axes à l'ACP réalisée avec les données mesurées à la station Bira pendant la période de pleine feuillaison des arbres K1 et K3.**

	Axe 1		Axe 2	
	Corrélation de la variable à l'axe	Contribution de la variable à l'axe en %	Corrélation de la variable à l'axe	Contribution de la variable à l'axe en %
VPDmax	-0,8595	74%	-0,0232	0%
Rnet journalier	-0,635	40%	0,669	45%
Pluie journalière	0,4277	18%	-0,0658	0%
DFS K-37-5	-0,811	66%	0,5095	26%
DFS K-32-5	-0,9132	83%	0,2535	6%
Stock 0-100cm	0,7426	55%	0,6227	39%
Stock 0-30cm	0,768	59%	0,592	35%
Profondeur de la nappe	-0,3077	9%	-0,5223	27%
% de la variance totale expliquée par l'axe (% cumulé)	4,0524	51 % (51 %)	1,7873	22 % (73 %)



**Figure 13 : Cercle de corrélation des variables réalisé avec les données mesurées à la station Bira pendant la période de pleine feuillaison des arbres K1 et K3.**

## **🌳 Les paramètres météorologiques**

Les Figures 9a et 10a montrent les tendances saisonnières de l'Eto et les variations de la pluie journalière. Les figures 9b et 10b montrent les tendances saisonnières des variables météorologiques : le Rnet journalier et le maximum journalier de VPD (VPDmax). La Figure 14 montre seulement les variations de la DFS du capteur I-55-5 en fonction des paramètres physiques car les observations faites sur ce capteur sont similaires à celles faites sur les autres capteurs (en Annexe 4 pour I-37-5, en Annexe 5 pour K-32-5 et en Annexe 6 pour K-37-5). Sur la Figure 14, les points bleus correspondent à la DFS enregistrée au moment où plus de 50% des feuilles de l'arbre sont épanouies (pendant la pleine feuillaison) et les points rouges correspondent à la DFS enregistrée au moment où moins de 50% des feuilles de l'arbre sont épanouies (pendant la mise en feuille ou la défeuillaison).

La DFS est à sa valeur maximale avant les premières pluies qui débutent le 17/02/09, (Figures 9a et 10a en relation avec les Figures 9c, 9d et 10c, 10d) mais on remarque que la DFS du capteur K-32-5 augmente juste avant les premières pluies. La DFS est toujours à sa valeur maximale avant les dernières pluies qui finissent le 13/11/09, mais on remarque que la DFS des capteurs K-37-5 et I-55-5 diminue juste après les dernières pluies. La pluie journalière ne semble pas être déterminante de l'augmentation de la DFS et mais elle pourrait avoir une influence sur la diminution de la DFS. Cette observation est confirmée par la Figure 14e; les valeurs de la DFS varient sans lien avec les valeurs de la pluie journalière.

De mi-octobre à mi-décembre, le Rnet journalier baisse de 13 MJ.m<sup>-2</sup> à 6MJ.m<sup>-2</sup> alors que le VPDmax augmente de 1 kPa à environ 5 kPa (Figures 10b et 11b). La DFS diminue en même temps que le Rnet de mi-novembre à fin-décembre. De janvier à avril, le Rnet augmente à 13 MJ.m<sup>-2</sup> alors que le VPDmax augmente à 5 kPa tandis que la DFS augmente de fin décembre à mi-février. De mai à octobre, le Rnet et le VPDmax fluctuent autour de la valeur 13 MJ.m<sup>-2</sup>, pour le Rnet et autour de la valeur 1,5 kPa pour le VPDmax. Les variations de la DFS en fonction du Rnet et du VPDmax, représentées dans la Figure 13a montrent 2 périodes :

- Une période, correspondant au moment où la canopée est recouverte de moins de 50% de feuilles épanouies (en rouge), pendant laquelle les valeurs de la DFS ne sont pas influencées par les variations de Rnet et de VPDmax.

- Une période, correspondant à la pleine feuillaison (en bleue), pendant laquelle les valeurs de la DFS augmentent avec les valeurs de Rnet et de VPDmax, de façon non linéaire.

Les valeurs de l'Eto suivent les variations du Rnet (Figures 9a et 10a). Le paramètre Eto ne semble donc pas apporter une information supplémentaire par rapport à celle apportée par le Rnet et le VPDmax. Cette variable est en effet calculée à partir du Rnet, de VPD et de la vitesse du vent.

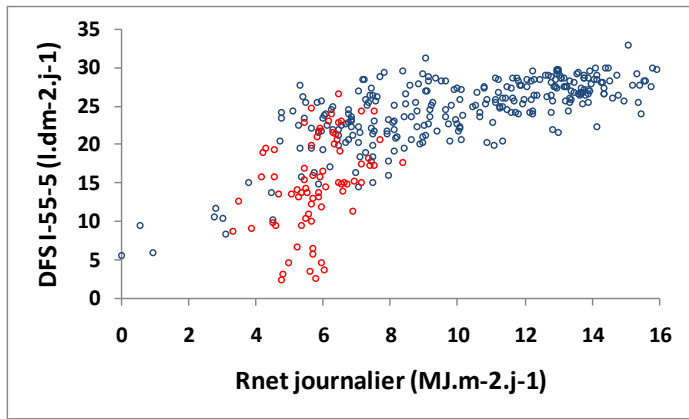
### **L'humidité du sol**

De début novembre à début avril, le stock d'eau de la couche de sol 0-30cm diminue de sa valeur maximale 75 mm à sa valeur minimale 32mm (Figures 9e et 10e). Sur cette même période, le stock d'eau de la couche de sol 0-100 cm diminue de sa valeur maximale 350 mm à sa valeur minimale 200mm sur la station de Béléfoungou, et de 250 à 150 mm sur la station de Bira. Jusqu'à fin décembre, la DFS diminue en même temps que les stocks à cause de la défeuillaison. Cependant, lorsque la DFS atteint sa valeur maximale au plus tard mi-février, le stock 0-100cm et 0-30cm est toujours minimale. Ensuite, le stock d'eau de la couche 0-30cm et 0-100cm augmente avec les premières pluies jusqu'à son maximum en juillet. La DFS est alors encore à sa valeur maximale. Les Figures 9c, 9d et 10c, 10d en relation avec les Figures 9e et 10e montrent que les variations de la DFS ne devraient pas être influencées par les variations des stocks 0-30cm et 0-100cm. Cette conclusion est confirmée par les Figures 14c et 14d, sur lesquelles les valeurs de la DFS varient sans lien avec les valeurs de l'humidité des couches de sol 0-30cm et 0-100cm.

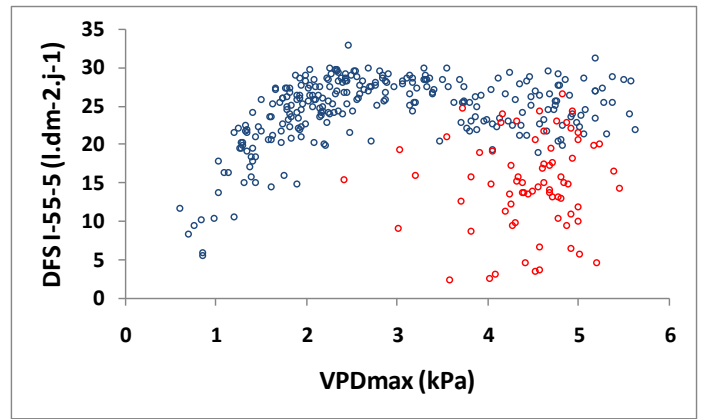
### **La profondeur de la nappe**

D'après la Figure 9e, pour la station de Béléfoungou, lorsque la profondeur de la nappe est minimale à partir de début février, la DFS est à sa valeur maximale depuis janvier pour le capteur I-37-5 (Figures 9d). On remarque que la DFS du capteur I-55-5 atteint sa valeur maximale en même temps que la nappe atteint sa valeur minimale mais que la DFS de ce capteur a commencé à augmenter plus d'un mois après le début de la diminution de la profondeur de la nappe (Figures 9c). Lorsque la profondeur de la nappe est maximale à partir de fin juin, la DFS est alors encore à valeur maximale. Sur la figure 10e, pour la station de Bira, lorsque la profondeur de la nappe est maximale, début juillet, la DFS est à sa valeur

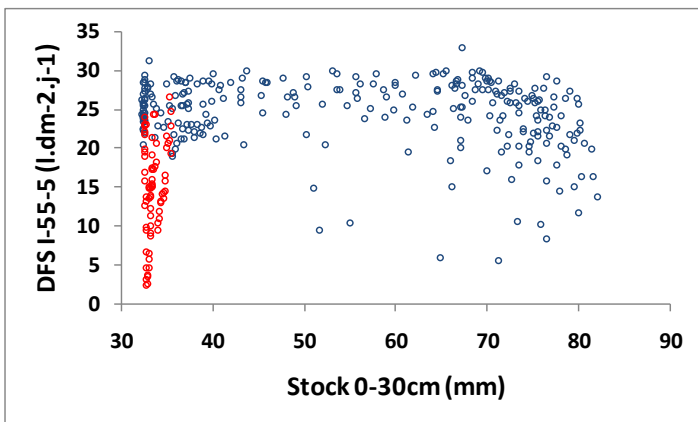
maximale depuis février. Au contraire lorsque la profondeur de la nappe est minimale, fin août, la DFS reste à sa valeur maximale. La profondeur de la nappe ne semble donc pas limiter la DFS sur les 2 stations. Cette conclusion est confirmée par la Figure 14f, sur laquelle les valeurs de la DFS varient sans lien avec les valeurs de la profondeur de la nappe.



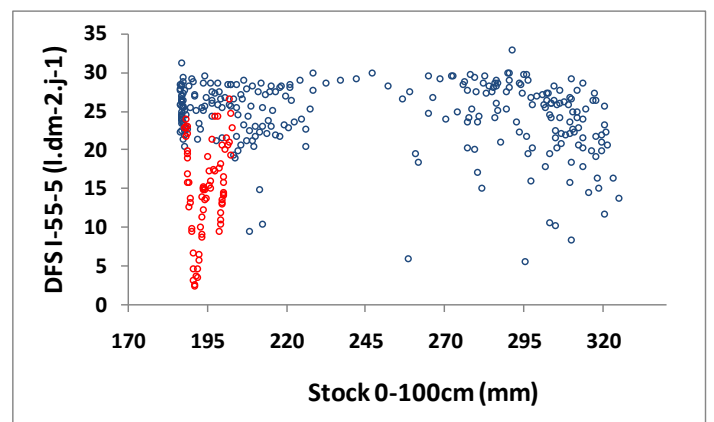
(a)



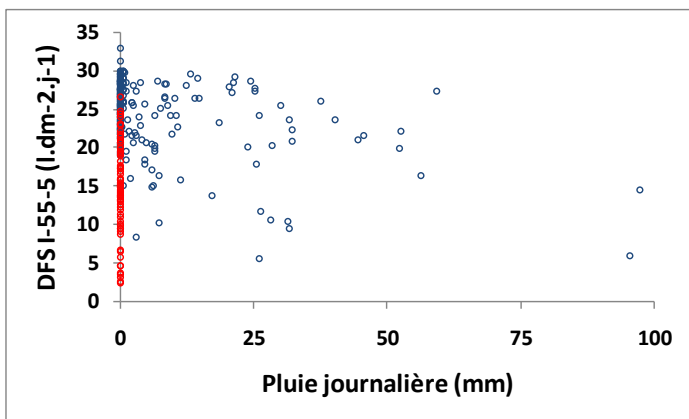
(b)



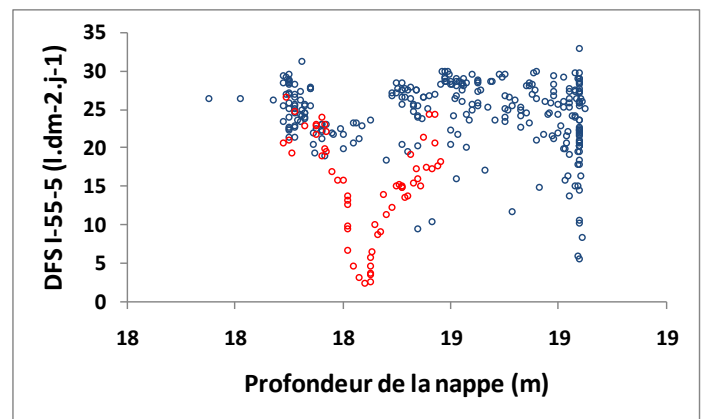
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 14 : Variations de la DFS du capteur I-55-5 (l.dm-2.j-1) en fonction des paramètres physiques

Les paramètres physiques sont : Rnet (MJ.m-2) (a), VPDmax (kPa) (b), Stock-0-100cm (mm) (c), Stock-0-30cm (mm) (d), Pluie journalière (mm) (e), profondeur de la nappe (m) (f).

### IV.3 Variations journalières de la densité de flux de sève

#### 🌳 Régression non linéaire entre la DFS et les facteurs Rnet et VPDmax

Nous allons chercher à caractériser la relation non linéaire entre la DFS et le Rnet journalier d'une part, et entre la DFS et le VPDmax d'autre part, mise en évidence pendant la période de pleine feuillaison des arbres (Figure 14). Le DFS augmente avec le Rnet journalier et avec le VPDmax puis atteint un palier pour lequel l'augmentation de Rnet et de VPDmax n'a plus d'influence sur la DFS. Nous avons donc calé les paramètres A et b de la fonction d'équation 10 sur les données de DFS en fonction de VPDmax (Figures 15a, 15b, 15c et 15d) et du Rnet journalier (Figures 15e, 15f, 15g et 15h), pendant la pleine feuillaison des arbres.

$$Y = A (1 - \exp(-b \times X)) \quad \text{Equations 10}$$

Avec : Y = DFS (en l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>)

X = Rnet journalier (en MJ.m<sup>-2</sup>) ou VPDmax (kPa)

A = Palier atteint par DFS quand X tend vers l'infini.

B = Pente de la phase de croissance de la courbe.

L'écart quadratique moyen (équation 11) est le paramètre que l'on minimise à l'aide du solveur d'EXCEL.

$$\text{Ecart quadratique moyen} = \frac{1}{n} \times \sum (DFS \text{ observé} - DFS \text{ estimé})^2 \quad \text{Equation 11}$$

L'erreur absolue moyenne qui est l'écart quadratique moyen divisé par la somme du carré des valeurs de la DFS observées (en pourcentage) permet de comparer la qualité des régressions. De façon à comparer les caractéristiques des régressions pour deux espèces différentes, nous calculons les nombre suivants de façon à préciser l'abscisse pour laquelle la DFS est proche du palier. Le nombre :  $\ln(Ab)/b$  (avec ln : logarithme népérien), correspond à l'abscisse pour laquelle la tangente à la courbe est égale à 1 et le nombre  $-\ln(0,1)/b$ , correspond à l'abscisse pour laquelle la DFS est égale à 90% de la valeur du palier (Tableau 10).

Les valeurs de Rnet journalier correspondant à DFS égale à 90% du palier sont similaires pour les capteurs I-55-5, I-37-5 et K-32-5. Les valeurs de VPDmax correspondant à une DFS égale à 90% du palier sont similaires pour tous les capteurs. La DFS du capteur K-37-5 en fonction de Rnet journalier semble être plus lente à atteindre le palier (Tableau 10). Cette différence peut venir d'un mauvais échantillonnage des données de Rnet journalier et de DFS correspondant à la phase de croissance de la courbe. L'erreur absolue moyenne est très faible pour toutes les régressions, ce qui montre une bonne qualité des régressions.

**Tableau 9 : Résultats de la régression de DFS en fonction des paramètres physiques : le Rnet (MJ.m-2) et le VPDmax (kPa).**

Nom capteur	A		b		LN (Ab)/b		-LN(0,1)/b		Erreur absolue moyenne (%)	
	VPDmax	Rnet	VPDmax	Rnet	VPDmax	Rnet	VPDmax	Rnet	VPDmax	Rnet
I-55-5	27,61	28,47	1,05	0,23	3,21	8,25	2,20	10,21	2,10E-02	1,90E-02
I-37-5	22,49	23,98	1,06	0,20	2,99	7,82	2,17	11,43	4,13E-02	3,57E-02
K-32-5	24,62	22,57	0,75	0,25	3,88	6,95	3,07	9,30	2,92E-02	4,68E-02
K-37-5	22,70	28,54	0,90	0,10	3,35	10,45	2,55	21,97	2,23E-02	1,39E-02

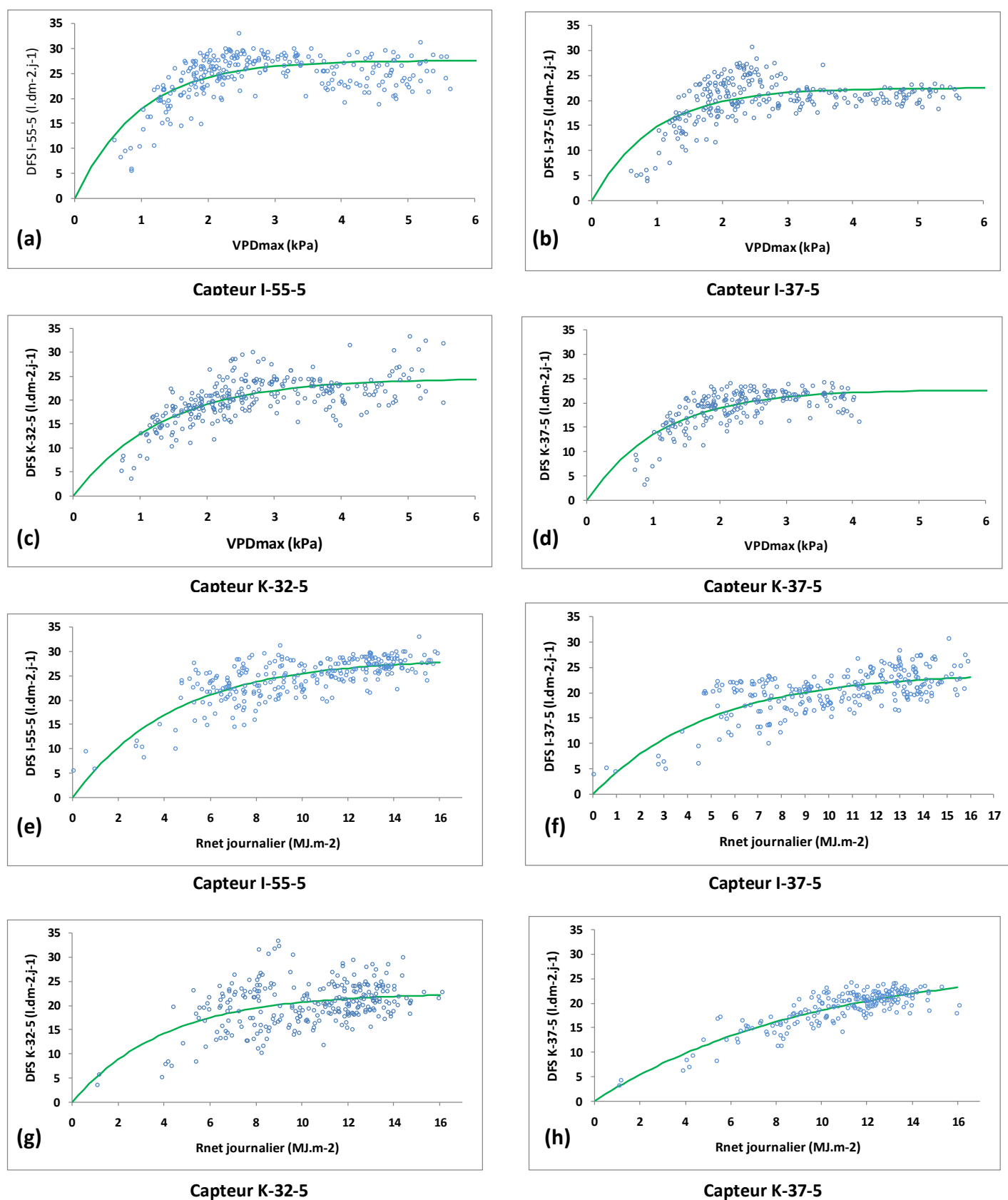


Figure 15 : Régressions entre la DFS (l.dm-2.j-1) des capteurs I-55-5, I-37-5, K-32-5 et K-37-5, pendant la période de pleine feuillaison et les variables : Rnet (MJ.m-2) et VPDmax (kPa)

### **🌳 Variations de la DFS et des facteurs Rnet, VPD à l'intérieur d'une journée caractéristique de la saison sèche et de la saison des pluies**

Les variations de la DFS au pas de temps 30 minutes sont comparées aux variations des facteurs physiques mesurables au même pas de temps : le Rnet, le VPD et la pluviométrie sur la station de Béléfoungou (Figure 16 et 17). La profondeur de la nappe et le stock en eau du sol ne sont pas mesurés au pas de temps 30 minutes (mesures au pas de temps horaire pour le stock et au pas de temps journalier pour la profondeur de la nappe). On trace la courbe de la DFS des capteurs I-55-5 et I-37-5, du Rnetn du VPD et de la pluie de la station de Béléfoungou en fonction du temps avec un pas de temps de 30 minutes (Figures 16 et 17). Les observations faites sur ces figures sont similaires à celles faites en traçant la courbe de la DFS des capteurs K-32-5 et K-37-5, de Rnet, du VPD et de la pluie sur la station de Bira en fonction du temps avec un pas de temps de 30 minutes (en Annexe 7).

La figure 16 montre l'allure des variations de la DFS pendant 5 jours en saison sèche du 1/02/09 au 5/02/09 et pendant 5 jours en saison des pluies du 25/06/09 au 30/06/09. On note que pendant ces deux périodes, l'arbre étudié est en pleine feuillaison. En saison sèche, l'allure de la DFS ressemble à une sinusoïde de période un jour (Figure 16a). En saison des pluies, l'allure de la DFS ressemble aussi à une sinusoïde de période un jour, les jours : 25, 27 et 28/06/09. Au contraire, l'allure de la DFS n'est plus constante le 26/06/09 et le 29/06/09(Figure 16b).

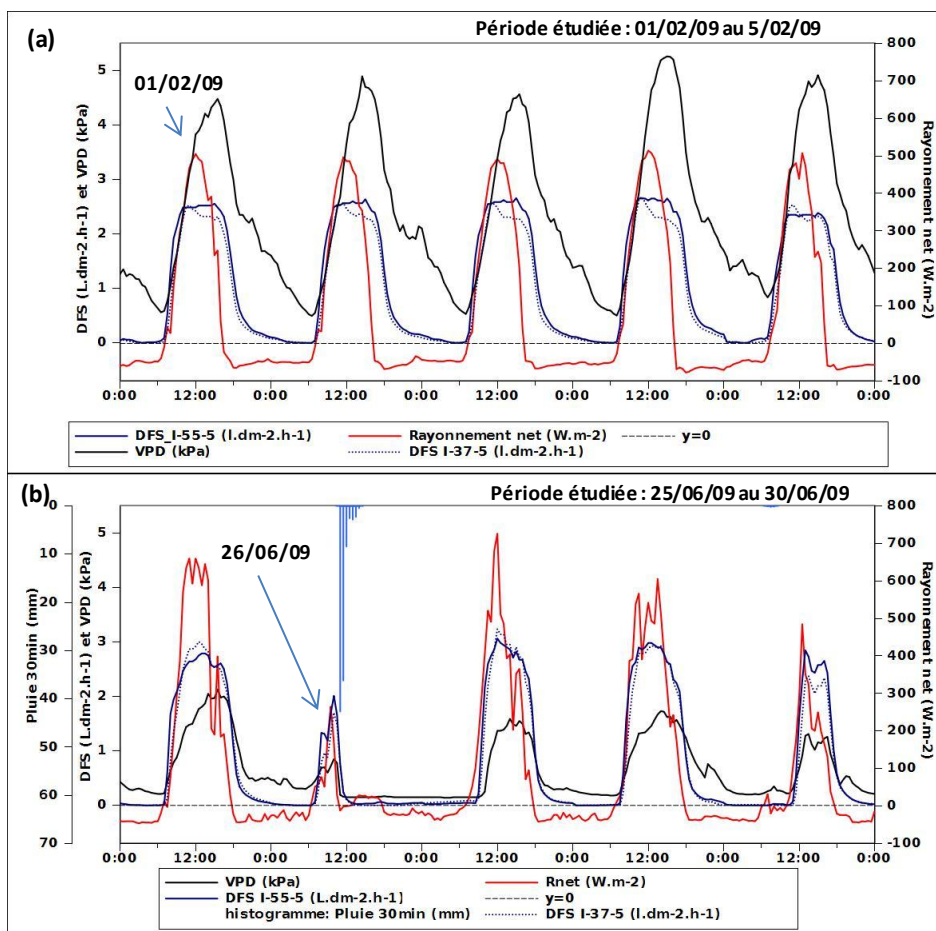


Figure 16 : Graphiques des variations journalières de la DFS des capteurs I-55-5 et I-37-5, du rayonnement net (Rnet) et du déficit de saturation de l'air (VPD) sur 5 jours en saison sèche (a) et en saison des pluies (b)

La figure 17 permet de procéder à un agrandissement sur un jour représentatif des variations des Figures 16a et 16b. La Figure 17a montre que la DFS est non nulle à partir de 7h00, augmente ensuite rapidement pour atteindre son maximum entre 10h00 et 16h00 et diminue ensuite à partir de 16h30. La DFS au niveau journalier semble suivre les variations du rayonnement net : elle démarre quand le Rnet est supérieur à 0 (correspond en général à 1h30 après le lever du soleil) et s'annule un peu après que le Rnet soit inférieur à 0 (correspond en général à 1h30 avant le coucher du soleil). Les variations du VPD suivent les variations du Rnet et de la DFS avec un léger décalage pour l'atteinte de son maximum.

La Figure 16b montre l'influence sur la DFS, d'un événement pluvieux important (95 mm) entre 11h et 14h, le 27/06/09. Avant la tombée de la pluie, on observe une baisse du Rnet et du VPD, qui entraîne une diminution de la DFS alors qu'au moment de la tombée de la pluie, le Rnet, le VPD et la DFS s'annulent sans que ce soit la nuit. La diminution de Rnet et de VPD avant l'arrivée de la pluie est probablement en lien avec l'augmentation de la couche nuageuse qui doit précéder la pluie.

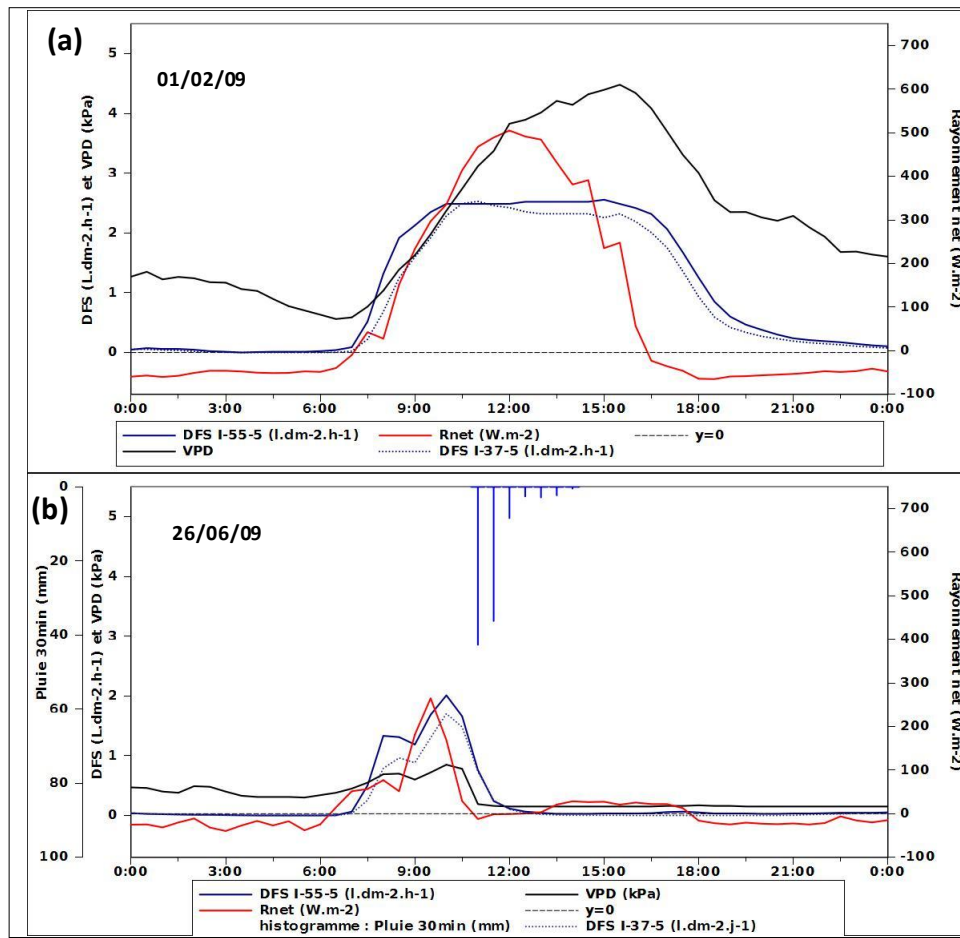


Figure 17 : Variations de la densité de flux de sève (DFS) des capteurs I-55-5 et I-37-2, de Rnet et du VPD pour la journée du 01/02/09 (a) et pour la journée du 26/06/09 (b).

L'étude d'une période plus longue (du 01/02/09 au 26/06/09) montre que la DFS maximale journalière de l'espèce *Isoberlinia doka* varie entre 2,5 et 2,8 l.dm<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> pour un DBH de 55 cm et entre 2,4 et 2,5 l.dm<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> pour un DBH de 37 cm. Pendant cette même période, la DFS maximale journalière de l'espèce *Vitellaria paradoxa* varie entre 2,1 à 2,4 l.dm<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> pour un DBH de 32 cm, et entre 2,5 l.dm<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> pour un DBH de 37 cm.

## V. DISCUSSION

### V.1 Estimations de la transpiration ligneuse à l'échelle saisonnière et journalière

De février à octobre, la densité de flux de sève de *Vitellaria paradoxa* et d'*Isoberlinia doka* est constante et sa gamme de valeurs est similaire pour les deux espèces ligneuses (les valeurs de la moyenne glissantes sur 5 jours de la DFS journalière varient entre 14 et 30 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup> pour un DBH supérieur à 32 cm). Cette plage de variations des valeurs de la DFS correspond à celle obtenue par (Do et al., 2008) au Nord Sénégal (précipitation annuelle de 200 à 400 mm) pour *Acacia tortilis* (12 à 30 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>).

Une étude faite dans une savane parc du Burkina Faso (précipitation annuelle de 730 mm) montre que *Vitellaria paradoxa* transpirent 121 l.j<sup>-1</sup> (Bayala et al., 2008). Ce résultat est supérieur aux variations de flux de sève calculée sur cette même espèce dans notre étude (29 et 62 l.j<sup>-1</sup>, pour un arbre de DBH de 32 cm et 40 et 66 l.j<sup>-1</sup> pour un arbre de DBH de 37 cm). Cette différence pourrait s'expliquer éventuellement par des arbres de plus grand diamètre que ceux étudiés ici. Mais les auteurs n'indiquent pas la taille.

A l'échelle journalière, pendant la période de pleine feuillaison, les résultats montrent que la DFS maximale journalière de *Vitellaria paradoxa* est au plus de 2,5 l.dm<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> pour les arbres de DBH de supérieur à 32 cm et pour *Isoberlinia doka* qu'elle est au plus de 2,8 l.dm<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> pour l'arbre de DBH 55 cm et au plus de 2,5 l.dm<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> pour l'arbre de DBH 37 cm. Ces résultats se rapprochent des valeurs de DFS mesurées par Granier et al., (1996) dans une forêt tropicale de Guyane française (précipitation annuelle de 2200 mm), qui sont de 3 à 4 l.dm<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> pour les espèces ligneuses dominantes et de 1 à 1,5 l.dm<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> pour les espèces ligneuses dominées.

### V.2 les facteurs influents sur la densité de flux de sève

A l'échelle saisonnière, la phénologie foliaire est le principal facteur responsable des variations de la transpiration. Cette conclusion rejoint celle de Do et al., (2008), qui a montré que l'espèce ligneuse *Acacia tortilis* transpire de façon constante toute l'année, excepté pendant le maximum de la saison sèche, qui correspond aussi à la défeuillaison maximale.

L'analyse à l'échelle journalière des paramètres météorologique a montré que pour les deux espèces ligneuses étudiées, le rayonnement net et le VPD sont les facteurs les plus influents sur la transpiration. Ce résultat semble cohérent puisque l'action de la lumière agit sur l'ouverture de stomates (Heller et al.,1998) et permet ainsi la libération de l'eau retenue dans la feuille, qui est fonction de la demande évaporatoire de l'air au-dessus de la canopée. L'observation des variations de la DFS à l'échelle d'un événement pluvieux a montré que la présence de pluie diminue les facteurs Rnet et VPD et donc la DFS. Granier (1985, 1987) suggère que l'interception de l'eau par le feuillage provoque un blocage de la transpiration ; l'énergie incidente est alors utilisée pour évaporer l'eau interceptée.

L'analyse à l'échelle saisonnière a montré que la ressource en eau (stock 0-100cm et 0-30cm) n'a pas une influence significative sur la transpiration ligneuse. Ce résultat concorde avec celui de Do et al., (2008), qui concluent qu'une augmentation de la quantité de l'eau du sol, par des pluies ou une irrigation, n'a pas beaucoup augmenté le maximum journalier ou annuel de la transpiration. La pluie journalière ne semble pas être déterminante de l'augmentation de la DFS et mais elle pourrait avoir une influence sur la diminution de la DFS. Cette observation ne contredit pas la conclusion de Seghieri et al (2009), selon laquelle la pluviométrie n'influence pas la phénologie foliaire en environnement soudano-guinéen (la phénologie foliaire étant le principal facteur responsable des variations saisonnières de la DFS).

L'allure de la relation entre la DFS et les stades phénologiques ont montré que les valeurs de la DFS du capteur I-55-5 sont plus grandes que celle des capteurs I-37-5 et I-23-5. On peut expliquer cette différence par l'influence qu'à la position de l'arbre étudié par rapport à ses congénères sur sa transpiration. Dans le cas du peuplement de la forêt tropicale de Parakou (Guyane française), Granier et al. (1996) a observé que la DFS dépend du statut de l'arbre dans le peuplement : les arbres dominés ont un accès à la lumière limité par les arbres dominants. Par conséquent, ils ont une DFS plus faible que celle des arbres dominants. La hauteur des arbres étant reliée positivement à leur DBH. Les arbres de grand DBH dominent ceux de plus petit DBH. Cependant le faible effectif pris en compte dans cette étude implique la nécessité de vérifier cette hypothèse sur un plus grand échantillon.

Un décalage du début des pluies (avril) avec l'atteinte du seuil d'humidité maximum de la couche 0-100 cm et 0-30cm et avec l'atteinte de la profondeur minimale de la nappe, est visible pour les 2 stations. La transpiration constante de *Vitellaria paradoxa* et d'*Isobertinia*

*doka* (de mars à octobre) et le décalage entre le début des pluies et l'atteinte de la profondeur minimale de la nappe, ne contredit pas l'hypothèse émise par Malinur et al. (2007) sur le fait que le tarissement des nappes pourrait être dû une évapotranspiration du couvert arboré, le drainage profond dans le socle fracturé n'étant cependant pas à exclure totalement. Le décalage de la profondeur de la nappe avec les pluies est plus faible à Bira qu'à Béléfoungou car la nappe de Bira est moins profonde (6 m) que la nappe de Béléfoungou (20 m), ce qui diminue le temps d'infiltration pour l'atteindre. De plus, Bayala et al., (2008) émettent l'hypothèse que *Vitellaria paradoxa* et *Parkia biglobosa* ont des racines au-delà du premier mètre de profondeur, ce qui leur permettrait d'avoir donc accès à la nappe se situant entre 3 et 5m. Les arbres étudiés ici pourraient donc contribuer à la diminution de la profondeur de la nappe, par un prélèvement direct dans celle-ci, particulièrement à Bira où la nappe est la moins profonde.

### **V.3 Les limites de notre étude**

Au niveau saisonnier, la phénologie n'est pas toujours en phase avec les variations de la DFS : la DFS maximale est atteinte avant que la pleine feuillaison soit observée. Cela pourrait s'expliquer par l'influence de l'âge des feuilles, les feuilles jeunes pouvant être plus actives que les feuilles plus âgées. La transpiration maximale de l'arbre pourrait être donc atteinte avant que la canopée soit recouverte de plus de 50% de feuilles matures.

Des travaux antérieurs aux nôtres montrent les limites techniques du dispositif utilisé. La précision relative des flux journaliers est estimée à 10% (Do et al., 1998). Le profil radial de la densité de flux de sève peut être sous la forme d'un gradient de la densité de flux de sève, avec une densité de flux de sève qui est maximale dans la partie extérieur du bois d'aubier et qui diminue vers l'intérieur (James et al. 2002, Clearwater et al., 1998), soit l'inverse. Le fait que tous les capteurs de 1 cm de long aient enregistré des valeurs toujours plus basses que ceux de 5 cm soutiendraient l'hypothèse que les deux espèces étudiées soient dans le deuxième cas. Ainsi la profondeur d'insertion du capteur de flux de sève influence la valeur de la densité de flux de sève, qui est sous-estimée ou surestimée. Do et Rocheteau (2002) ont montré une influence du gradient thermique naturel vertical sur la mesure de la densité de flux de sève. Ils ont proposé une solution technique pour atténuer son influence : la sonde chauffée subit un cycle alternant une phase de chauffage pendant 45min, puis une phase de refroidissement pendant 15min.

## **VI. CONCLUSION**

Nous avons travaillé sur des données couvrant plus d'un an et avons analysé la transpiration d'arbres de DBH supérieurs à 32 cm sur chaque station.

Nous avons montré qu'à l'échelle saisonnière, la densité de flux de sève des deux espèces ligneuses varie peu et baisse pendant les périodes de défeuillaison et de mise en feuille. A cette échelle, la feuillaison est donc le principal facteur contrôlant l'occurrence de la transpiration. Les ressources en eau (pluie journalière, stock en eau du sol des couches 0-30cm et 0-100cm et profondeur de la nappe) ne semblent pas avoir d'influence significative sur la DFS, mais un traitement statistique plus approfondi et l'analyse de l'effet de l'humidité du sol jusqu'à 9 m devrait permettre de valider ces résultats. A l'échelle journalière, pendant la période de pleine feuillaison des arbres, les facteurs les plus significativement limitants de la DFS sont : le rayonnement net et le VPD. Pendant cette période, nous avons cherché à caractériser la relation non linéaire entre la DFS et le Rnet journalier d'une part, et entre la DFS et le VPDmax d'autre part. A l'intérieur d'une journée, le Rnet et la DFS sont influencés par l'occurrence de la pluie.

La hauteur d'un arbre par rapport à celles de ses voisins, semble influencer sur l'intensité de la transpiration. Cette conclusion pourra être confirmée ou infirmée par la prise en compte d'un effectif d'arbres instrumentés plus grand.

## VII. PERSPECTIVES

Le bilan de fonctionnement des capteurs de flux de sève fait sur les données enregistrées du 23/11/08 au 17/04/10, a montré que seuls les capteurs comportant des sondes de longueur 50 mm, sont significativement sensibles aux variations de la densité de flux de sève. Un examen visuel de tous les capteurs, lors de la prochaine mission de terrain, permettra de vérifier ce bilan de fonctionnement. Cette mission de terrain sera aussi l'occasion d'installer des capteurs à différentes profondeurs du bois d'aubier, de façon à déterminer l'existence et la forme du profil radial de la densité de flux de sève.

L'estimation du flux de sève a été calculée seulement pour l'espèce ligneuse *Vitellaria paradoxa*, car nous ne disposons pas de relation liant la surface de bois d'aubier au DBH pour l'espèce *Isoberlinia doka*. Les flux de sève obtenus à l'échelle de l'arbre, peuvent être extrapolés à l'échelle de la population de l'espèce ligneuse considérée, grâce à la somme des densités de flux de sève mesurées selon les classes de DBH. Cette somme est multipliée par l'estimation de la surface totale d'aubier à 1m<sup>3</sup>0 de la population (Soubie et al., 2008). Cette méthode permet d'estimer la transpiration d'un peuplement forestier en prenant en compte la variabilité de la transpiration des arbres qui compose ce peuplement. L'estimation de la transpiration du peuplement entier pour les deux espèces ligneuses, ne sera donc possible qu'avec l'obtention de données de densité de flux de sève, mesurées sur un plus grand nombre d'arbres de DBH différents.

L'humidité du sol et la profondeur de la nappe ne semblent ne pas avoir d'avoir d'influence sur la DFS. Ce résultat pourra être critiqué en étudiant les variations du potentiel hydrique des feuilles de l'arbre, qui rendent compte du stress hydrique de l'arbre. Une diminution de sa valeur (valeur plus négative) montre en effet un effet limitant du stock en eau dans le sol au niveau des racines. Les mesures d'humidité par sonde neutronique, dont la profondeur d'étude est la couche : 0 à 5 m pour Bira et 0 à 9 m pour Béléfougou (Séguis et al., 2009) permettront aussi d'étudier l'influence des stocks en eau de cette couche sur la DFS. De plus, nous n'avons pas d'indication sur la profondeur racinaire des arbres *Vitellaria paradoxa* et *Isoberlinia doka*, il serait donc envisageable d'étudier le système racinaires de ces deux espèces (par exemple par des excavations pour l'étude des racines peu profondes et par des méthodes géophysiques pour l'étude du profil des racines présentes à une profondeur inférieure à 10 m (Lubczynski, M. W, 2009)).

Des traitements statistiques complémentaires devraient permettre de prendre en compte la nature temporelle des données et les corrélations qui existent entre les facteurs explicatifs testés (corrélations partielles et régression linéaire multiple par exemple).

## VIII. BIBLIOGRAPHIE

Allen Richard G. et al., 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference Eto by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* 81, 1-22.

Arbonnier M. Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afriques de l'Ouest. Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Montpellier, France, p 214 et p485-486.

Aubreville, A., 1950. Flore forestière Soudano-Guinéenne AOF.-Cameroun-A.E.F. Éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales, Paris.

Bayala, J., Heng, L. K., Noordwijk, M. V., Ouedraogo, S. J., 2008. Hydraulic redistribution study in two natives tree species of agroforestry parklands of West African dry savanna. *Acta Oecologica* 34, 370-378.

Blanchard, M., Peugeot, C., Seghieri, J., 2007. Structure et dynamique saisonnière de la végétation sur quatres types de couverts végétal représentatifs de la diversité du bassin versant de la Donga, Mémoire de stage, Montpellier, France.

Clearwater, M. J., Meinzer, F. C., Andrade, J. L., Goldstein, G., Holbrook, N. M., 1999. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology* 19, 681-687.

Do, F., A. Rocheteau., Diagne A., L., Grouzis M., 1998. Flux de sève et consommation en eau d'*Acacia tortilis* dans le Nord Ferlo. *L'Acacia au Sénégal*, 65-80, Orstom Editions.

Do, F., Rocheteau, A., 2002. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. *Tree physiology* 22, 641-648.

Do, F., Rocheteau, A., Diagne, A. L., Goudiaby, V., Granier, A., Lhomme, J. P. 2008. Stable annual pattern of water use by *Acacia tortilis* in Sahelian Africa. *Tree Physiology* 28, 95-104.

Granier, A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by mean of sap flow measurement. *Tree Physiology* 3, 309-320.

- Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières* 42, 193-200.
- Granier, A., Huc, R., Barigah, S., 1996. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agricultural and Forest Meteorology* 78, 19-29.
- Grouzis, M., Sicot, M., 1980. A method for the phenological study of browse population in the Sahel : the influence of some ecological factors. H.N Le Houérou International Livestock Centre for Africa, 233-240, Addis Abeba, Ethiopie.
- Heller, R., Esnault, R., Lance, C., 1998. *Physiologie végétale, tome 1 : nutrition*, p 62-64, Dunod, Paris, France.
- Hopkins, W. G., 2003. *Physiologie végétale*. De Boeck et Larcier, Bruxelles, Belgique.
- James, S. A., Clearwater, M. J., Meinzer, F. C., Goldstein, G., 2002. Heat dissipation sensors of variable length for the measurement of sap flow in trees with deep sapwood. *Tree Physiology* 22, 277-283.
- Kamagaté, B., Séguis, L., Favreau, G., Seidel, J.L., Descroitre, M., Affaton, P., 2007. Processus et bilan des flux hydriques d'un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin (Donga, Haut-Ouémé). *Comptes Rendus Géosciences* 339, 418-429.
- Lubczynski, M. W., 2009. The hydrogeological role of trees in water-limited environments. *Hydrogeology Journal* 17, 247-259.
- Malinur, F., Séguis, L., Afouda, S., Ouani T., Arjounin, M., Bouchez, J.-M., 2007. Piézométrie des puits villageois de la Haute Vallée de l'Ouémé (Bénin) Période 2004-2005. Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé, Cotonou, Bénin.
- Obakeng, O. T., 2007. Soil moisture dynamics and evapotranspiration of the fringe of the Botswana Kalahari, with emphasis on deep rooting vegetation. Thèse. Université Vrije d'Amsterdam, Pays Bas.
- Seghieri, J., Vescovo, A., Padel, K., Soubie, R., Arjounin, M., Boulain, N., et al., 2009. Relationships between climate, soil moisture and phenology of the woody cover in two sites located along the West African latitudinal gradient. *Journal of Hydrology* 375, 78-89.

Séguis, L., Périault, A., Laurent, J-P., Ouani, T., Wubda, M., 2009. Mise en place d'un suivi neutronique sur les transects du bassin de la Donga (Bénin).

Soubie, R., 2008. Estimation de la transpiration végétale ligneuse de la feuille à la population en environnement soudanien. Mémoire de Master deuxième année, mention Fonctionnement et Modélisation des Ecosystèmes Terrestres, Université Bordeaux 1, France.

## **IX. ANNEXES**

### **Sommaire des annexes**

#### **Annexe 1 : Bilan de fonctionnement des capteurs de flux de sève**

- Critères d'évaluation de la sensibilité des capteurs à la densité de flux de sève
- État des capteurs de flux de sève sur *Isobertinia doka*
- État des capteurs de flux de sève sur *Vitellaria paradoxa*
- Conclusion

#### **Annexe 2 : Résultats de l'ACP1 réalisée avec les données mesurées sur la station de Bira pendant la période de novembre 2008 à décembre 2009**

#### **Annexe 3 : Résultats de l'ACP2 réalisée avec les données mesurées sur la station de Béléfoungou pendant la pleine feuillaison des arbres I1 et I2 incluse dans la période de novembre 2008 à décembre 2009**

#### **Annexe 4 : Variations de la DFS du capteur K-32-5 en fonction des paramètres physiques**

#### **Annexe 5 : Variations de la DFS du capteur K-37-5 en fonction des paramètres physiques**

#### **Annexe 6 : Variations de la DFS du capteur I-37-5 en fonction des paramètres physiques**

#### **Annexe 7 : DFS des capteurs K-32-5 et K-37-5, du Rnet et du VPD en en fonction temps avec un pas de temps de 30 minutes**

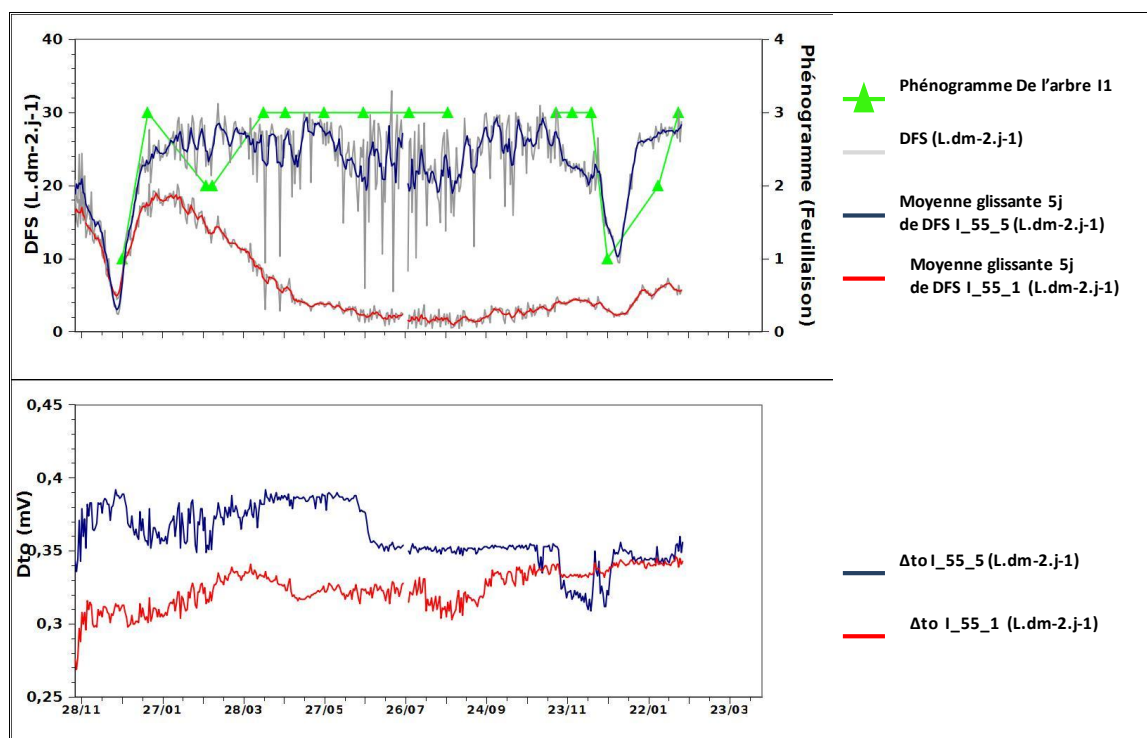
## **Annexe 1 : Bilan de fonctionnement des capteurs de flux de sève**

### **🌿 Critères d'évaluation de la sensibilité des capteurs à la densité de flux de sève**

La mission de terrain réalisée par Christophe Peugeot en juillet 2009 a relevé sur 4 capteurs (sonde de taille 1 cm) de la station de Béléfoungou, la présence de bourrelets d'écorce entraînant l'expulsion du capteur de l'arbre instrumenté. La sonde n'étant alors plus incérée dans le bois d'aubier, cette observation permet d'émettre l'hypothèse que certains capteurs sous-estiment la densité de flux (DFS) présente dans l'arbre instrumenté. Un bilan de fonctionnement des capteurs de flux de sève des stations de Béléfoungou et Bira, pour la période du 23 novembre 2008 au 17 avril 2010 est donc nécessaire. Il est basé sur l'analyse des données de la différence de température maximale entre la sonde chauffée et celle non chauffée ( $\Delta T_o$ , mesurée en mV mais 0,04mV correspondant à 1°C) et de la DFS (mesurée en  $l.dm^{-2}.j^{-1}$ ). L'hypothèse de base qui va nous servir à déterminer la sensibilité ou non des capteurs à la densité de flux de sève est la stabilité du  $\Delta T_o$  car la  $\Delta T_o$  est considérée comme constante au cours du temps. Cependant, certains capteurs composés de sondes de 1cm de long montrent un comportement inattendu, avec des valeurs de la  $\Delta T_o$  qui ne dérivent pas dans le temps, mais pour lesquels les valeurs de la DFS calculées à partir de ces  $\Delta T_o$  diminuent à partir d'une certaine date, et restent relativement faibles sur toute la période des mesures. Par précaution nous exploiterons pendant toute la période de mesure, seulement les données des capteurs dont les valeurs enregistrées en début de l'année 2009 sont du même ordre de grandeur que celles enregistrées au début de l'année 2010. Lors de la prochaine mission sur le terrain, un examen visuel de l'état de les capteurs, permettra de critiquer les résultats de ce bilan de fonctionnement.

## État des capteurs de flux de sève sur *Isoberlinia doka*

### - Capteur I-55-1 et I-55-5



**Figure 1 : Variations de la DFS journalière pour les capteurs I-55-1 et I-55-5 (l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>), leur moyenne glissante sur 5 jours et phénogramme (feuillaison) de l'arbre instrumenté (a)**

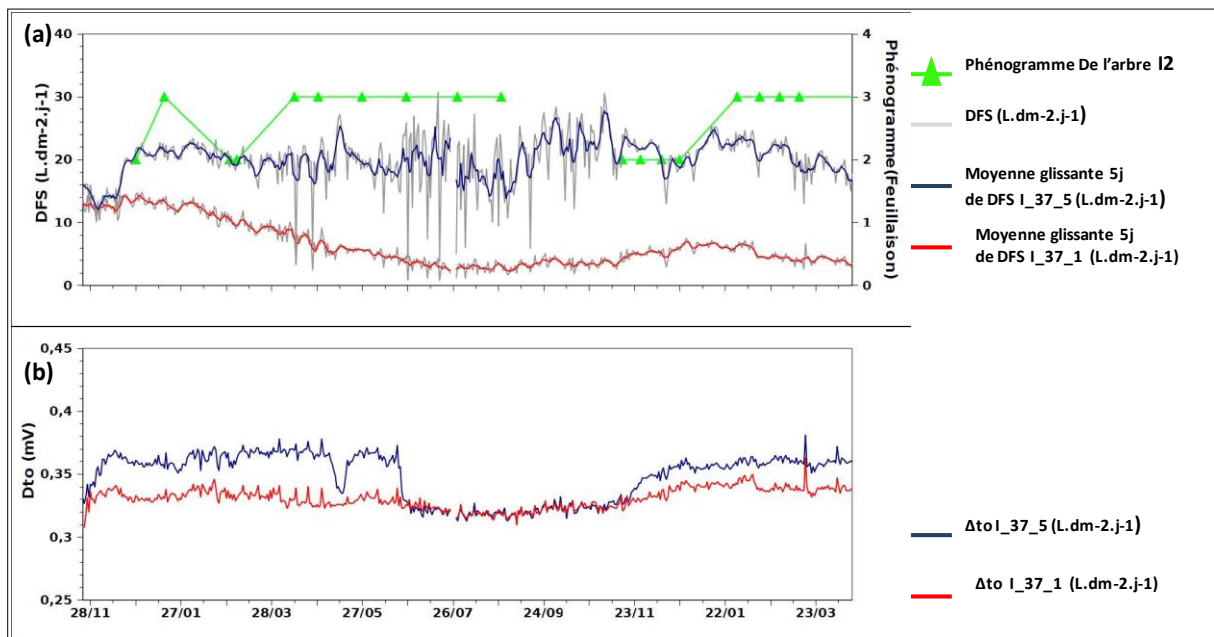
### **Différence de température maximum ( $\Delta T_o$ ) pour les capteurs I-55-1 et I-55-5 (b)**

*Observations de terrain* : Lors de la tournée de juillet 2009, il a été remarqué que l'arbre instrumenté expulse le capteur I-55-1. Le 17/02/2010, l'arbre instrumenté a été victime d'un incendie.

*Observations sur les données* : Ce traitement des données montre qu'avant l'incendie, les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur I-55-5 sont stables (Figure 1b), on en conclut que le capteur I-55-5 est fonctionnel. Les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur I-55-1 augmentent progressivement à partir du 22/12/08, on en conclut que le capteur I-55-1 n'est pas fonctionnel (Figure 1b). A la même date, les valeurs de la DFS du capteur I-55-1 n'ont plus les mêmes variations que le capteur I-55-5 (différence entre les DFS de plus de 1 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>) avec une DFS de 5,3 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup> pour le capteur I-55-5 et de 4 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup> que le capteur I-55-1 (Figure 1a). La DFS étant calculée à partir de la  $\Delta T_o$ , cette observation confirme la dérive du capteur I-55-1.

**Conclusion :** la perte de fonctionnalité du capteur I-55-5 s'est faite à partir de l'incendie alors que la perte de fonctionnalité du capteur I-55-1 s'est faite depuis la dérive de son  $\Delta T_o$ . On émet l'hypothèse que la dérive de ce capteur est due à son expulsion par l'arbre. Les mesures enregistrées par le capteur I-55-5 sont exploitables jusqu'au 16/02/10. Par précaution, les mesures enregistrées par le capteur I-37-1 ne sont pas exploitées.

- **Capteur I-37-1 et I-37-5**



**Figure 2 :** Variations de la DFS pour les capteurs I-37-1 et I-37-5 ( $\text{l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$ ), leurs moyennes glissantes sur 5 jours et le phénogramme (feuillaison) de l'arbre instrumenté au cours du temps (a)

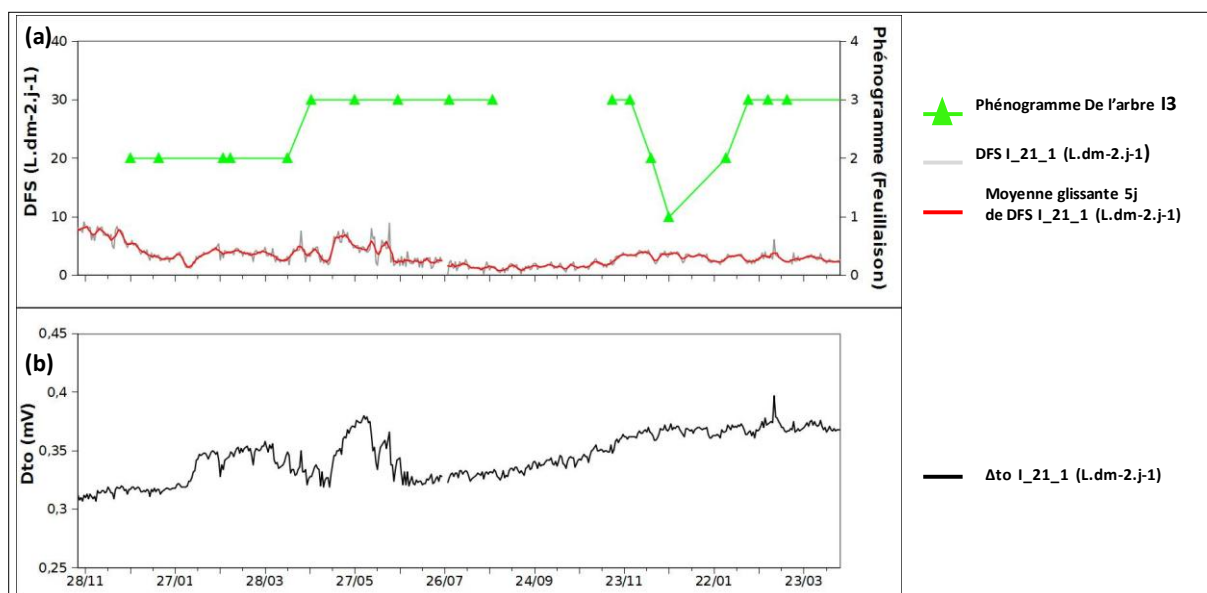
**$\Delta T_o$  pour les capteurs I-37-1 et I-37-5 au cours du temps (b)**

*Observations de terrain :* Lors de la tournée de juillet 2009, il a été remarqué que l'arbre instrumenté expulse le capteur I-37-1.

*Observations sur les données :* Les valeurs du  $\Delta T_o$  du capteur I-37-5 sont stables pendant toute la période d'étude (Figure 2b), on en conclut que le capteur I-37-5 est fonctionnel. Les valeurs du  $\Delta T_o$  du capteur I-37-1 sont stables, on conclut à la fonctionnalité du capteur I-37-1 (Figure 2b). Cependant à partir du 7/12/08 les valeurs de la DFS du capteur I-37-1 n'ont plus les mêmes variations que le capteur I-37-5 avec une DFS de  $14 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$  pour le capteur I-37-5 et de  $13 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$  pour le capteur I-37-1 (Figure 2a). A partir de cette date, les valeurs de la DFS pour le capteur I-37-1 diminuent, ce qui conduit à une DFS faible, ne dépassant pas les  $7 \text{ l.dm}^{-2}.\text{j}^{-1}$ .

**Conclusion :** le capteur I-37-5 est fonctionnel. L'examen des  $\Delta T_o$  n'a pas permis de conclure à la sensibilité ou non du capteur I-37-1 aux variations de DFS. On émet cependant l'hypothèse que la faible DFS du capteur I-37-1 montre son insensibilité aux variations de la DFS. Cette faible DFS pourrait être expliquée par son expulsion de l'arbre instrumenté ou par un profil de vitesse du flux de sève où la DFS augmente de la périphérie de la surface d'aubier vers l'intérieur. Les mesures enregistrées par le capteur I-37-5 sont exploitables du 23/11/08 au 17/04/10 (date du dernier relevé de données des capteurs). Par précaution, les mesures enregistrées par le capteur I-37-1 ne sont pas exploitées.

- **Capteur I-21-1**



**Figure 3 : Variations de la DFS pour le capteur I-21-1, de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS I-21-1 et du phénogramme (feuillaison) de l'arbre instrumenté au cours du temps (a)**

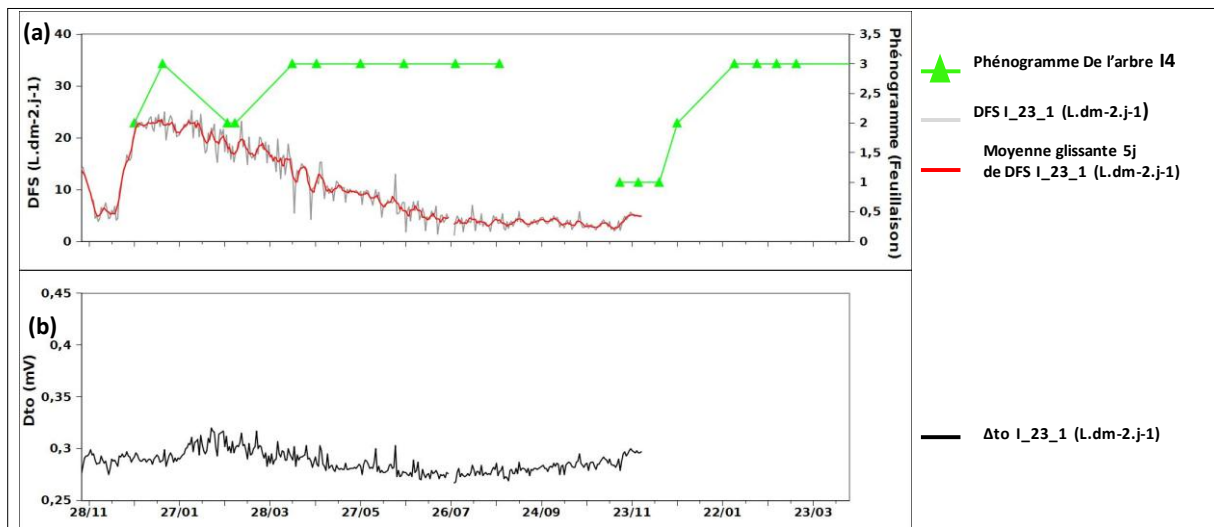
**Variations de  $\Delta T_o$  pour le capteur I-21-1 au cours du temps (b)**

*Observations de terrain :* Lors de la tournée de juillet 2009, il a été remarqué que l'arbre instrumenté possédait une cicatrice mais qu'il n'y avait pas d'expulsion du capteur I-21-1.

*Observations sur les données :* Les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur I-21-1 augmentent depuis l'installation du capteur (Figure 3b). On en conclut que le capteur I-21-1 est non fonctionnel.

**Conclusion :** Depuis le début de l'installation, le capteur I-21-1 est non fonctionnel. On émet l'hypothèse que la dérive de ce capteur est due à son expulsion par l'arbre. Aucune donnée provenant de ce capteur n'est exploitable.

- **Capteur I-23-1**



**Figure 4 : Variations de la DFS pour le capteur I-23-1, de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS I-23-1 et du phénogramme (feuillaison) de l'arbre instrumenté au cours du temps (a)**

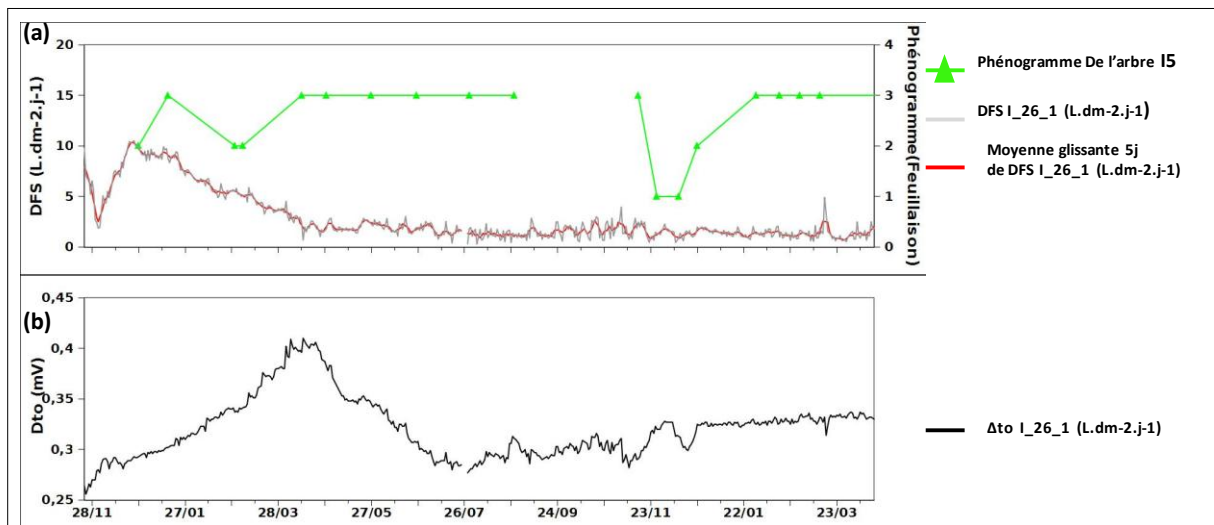
**Variations de  $\Delta To$  pour le capteur I-23-1 au cours du temps (b)**

*Observations de terrain :* lors de la tournée de juillet 2009, il n'a pas été remarqué d'anomalies sur le capteur I-23-1.

*Observations sur les données :* les valeurs de  $\Delta To$  du capteur I-23-1 restent stables jusqu'à l'arrêt de l'enregistrement : valeurs NAN (Not a Number), le 30/11/09 (Figure 4b). On en conclut que le capteur I-23-1 est fonctionnel avant cet arrêt. Cependant à partir du 9/04/09, la valeur de la DFS qui a pour valeur 19 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>, diminue jusqu'à une valeur faible, ne dépassant pas 5 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>(Figure 4a).

*Conclusion :* L'examen des  $\Delta To$  n'a pas permis de conclure à la sensibilité ou non du capteur I-23-1 aux variations de la DSF. On émet cependant l'hypothèse que la faible DFS du capteur I-23-1 montre son insensibilité aux variations de la DSF. Les mesures enregistrées par le capteur I-23-1 sont exploitables du 23/11/08 au 9/04/09.

- Capteur I-26-1



**Figure 5 : Variations de la DFS pour le capteur I-26-1, de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS I-26-1 et du phénogramme (feuillaison) de l'arbre instrumenté au cours du temps (a)**

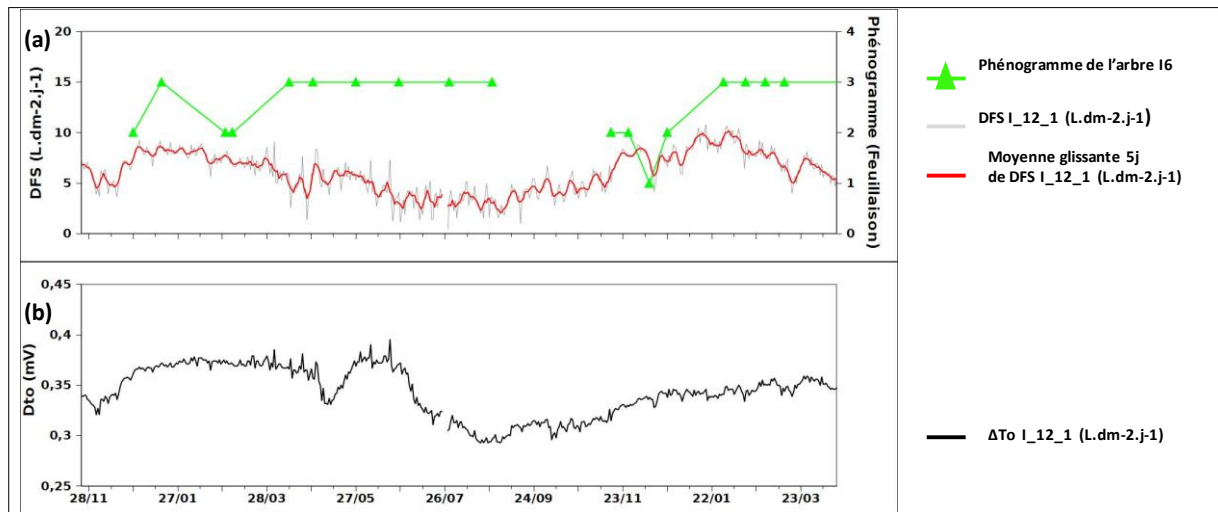
**Variations de  $\Delta T_o$  pour le capteur I-26-1 au cours du temps (b)**

*Observations de terrain* : Lors de la tournée de juillet 2009, il a été remarqué que l'arbre instrumenté expulse le capteur I-26-1.

*Observations sur les données* : Les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur I-26-1 sont instables depuis l'installation du capteur : elles augmentent fortement (de 0,25 à 0,41mV) puis diminuent fortement (de 0,41 à 0,29 mV) et restent ensuite constantes. On en conclut que le capteur I-26-1 est non fonctionnel (Figure 5b). Les valeurs de la DFS diminuent à partir du 22/01/09 de 9 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup> à moins de 1 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup> (Figure 5a). La DFS étant calculée à partir du  $\Delta T_o$ , cette observation confirme la dérive du capteur I-26-1.

*Conclusion* : Depuis le début de l'installation, le capteur I-26-1 est non fonctionnel. On émet l'hypothèse que la dérive de ce capteur est due à son expulsion par l'arbre. Aucune donnée provenant de ce capteur n'est exploitable.

- **Capteur I-12-1**



**Figure 6 : Variations de la DFS pour le capteur I-12-1, de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS I-12-1 et du phénogramme (feuillaison) de l'arbre instrumenté au cours du temps (a)**

**Variations de  $\Delta T_o$  pour le capteur I-12-1 au cours du temps (b).**

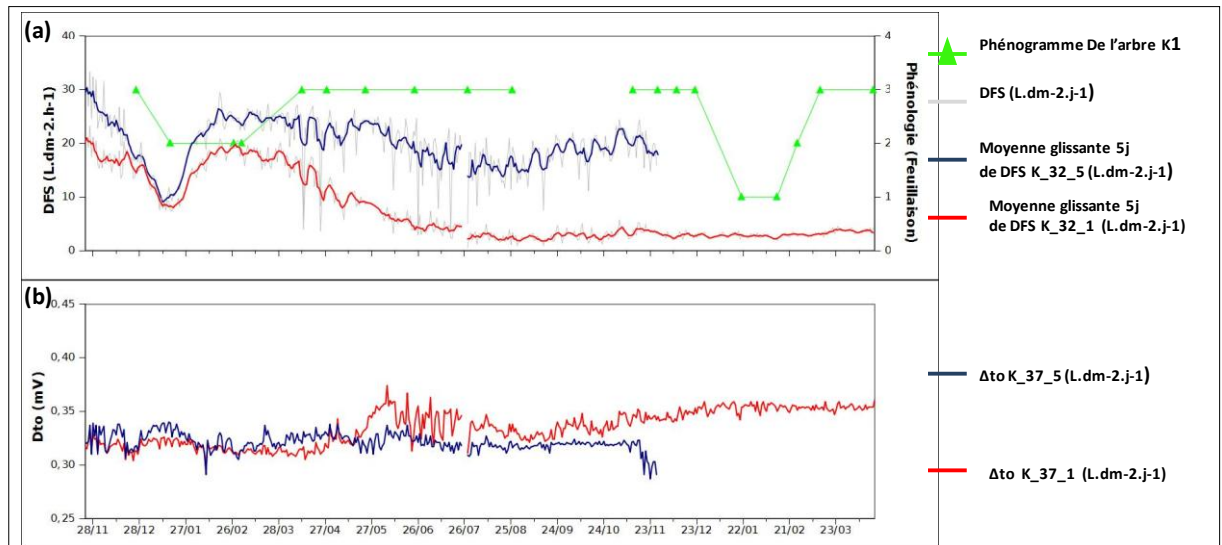
*Observations de terrain* : lors de la tournée de juillet 2009, il n'a pas été remarqué d'anomalies sur le capteur I-12-1.

*Observations sur les données* : les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur I-12-1 diminuent de 0,38 mV à 0,29 mV à partir du 21/04/09 (Figure 6b). On en conclut que le capteur I-12-1 ne fonctionne plus à partir de cette date.

*Conclusion* : Depuis le début du 21/04/09, le capteur I-12-1 est non fonctionnel. On émet l'hypothèse que la dérive de ce capteur est due à son expulsion par l'arbre. Les mesures enregistrées par le capteur I-12-1 sont exploitables du 23/11/08 au 21/04/09.

## État des capteurs de flux de sève sur *Vitellaria paradoxa*

### - Capteur K-32-1 et K-32-2



**Figure 7 : Graphique (a) : Variations de la densité de la DFS journalière pour les capteurs K-32-1 et K-32-5 ainsi que leur moyenne glissante sur 5 jours et phénogramme (feuillaison) de l'arbre K1 (a)**

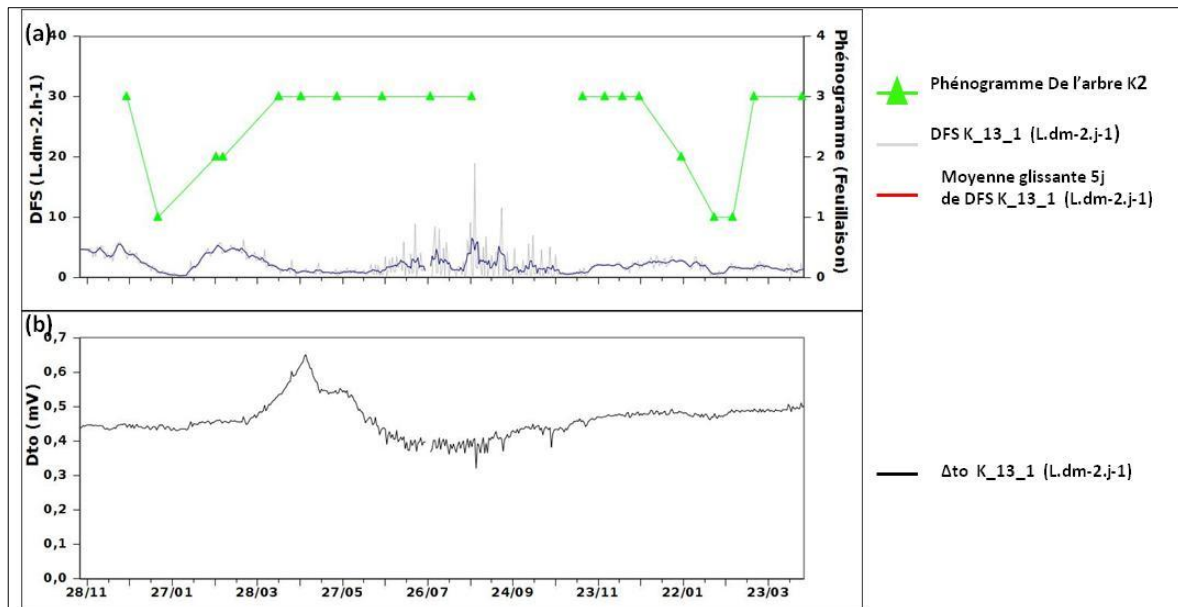
### Variations de $\Delta T_o$ pour les capteurs K-32-1 et K-32-5 (b)

*Observations de terrain* : lors de la tournée de juillet 2009, il n'a pas été remarqué d'anomalies sur le capteur K-37-1 et K-37-5.

*Observations sur les données* : les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur K-32-5 sont stables entre 0,29 et 0,34 mV jusqu'à l'arrêt de l'enregistrement : valeurs NAN (Not a Number), le 27/11/09 (Figure 7b). On en conclut que le capteur K-32-5 est fonctionnel pendant toute la période d'étude. Les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur K-32-1 sont stables entre 0,31 et 0,36 mV pendant toute la période d'étude (Figure 7b). Cependant depuis le début de l'installation, les valeurs de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS, du capteur K-32-1 et du capteur K-32-5 sont très différentes (respectivement 20 et 30 l.dm-2.j-1) (Figure 7a). On remarque aussi qu'à partir du 01/04/09, les valeurs de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS, pour le capteur K-32-1 diminuent, ce qui conduit à une DFS faible, ne dépassant pas les 5 l.dm-2.j-1.

*Conclusion* : le capteur K-32-5 est fonctionnel jusqu'à son arrêt le 27/11/09. L'examen des  $\Delta T_o$  n'a pas permis de conclure à la sensibilité ou non du capteur K-32-1 aux variations de la DSF. On émet cependant l'hypothèse que la faible DFS du capteur K-32-1 montre son insensibilité aux variations de la DSF, qui pourrait être expliquée par le profil de vitesse.

- **Capteur K-13-1**



**Figure 8 : Variations de la DFS journalière pour le capteur K-13-1 ainsi que sa moyenne glissante sur 5 jours et phénogramme (feuillaison) de l'arbre K2 (a)**

**Variations de  $\Delta T_o$  pour le capteur K-13-1 (b)**

*Observations de terrain :* lors de la tournée de juillet 2009, il n'a pas été remarqué d'anomalies sur le capteur K-13-1.

*Observations sur les données :* Les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur K-13-1 sont instables depuis l'installation du capteur : elles augmentent fortement (de 0,43 à 0,65 mV) puis diminuent fortement (de 0,65 à 0,36 mV) et restent ensuite constantes (Figure 8b). On en conclut que le capteur K-13-1 est non fonctionnel. Les valeurs faibles de la DFS (inférieures à 6 l.dm<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>) confirment la dérive du capteur K-13-1 (Figure 8a).

*Conclusion :* le capteur K-13-1 est non fonctionnel depuis le début de l'installation. Aucune donnée provenant de ce capteur ne peut être exploitable.

- Capteur K-37-1 et K-37-2

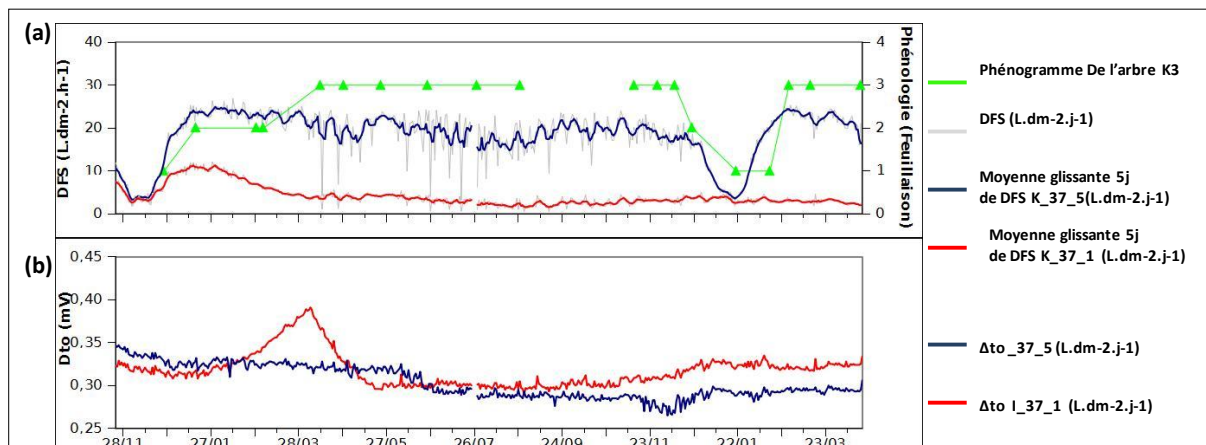


Figure 9 : Variations de la densité de flux de sève journalière (DFS) pour les capteurs K-37-1 et K-37-5 ainsi que leur moyenne glissante sur 5 jours et phénogramme (feuillaison) de l'arbre K3 (a)

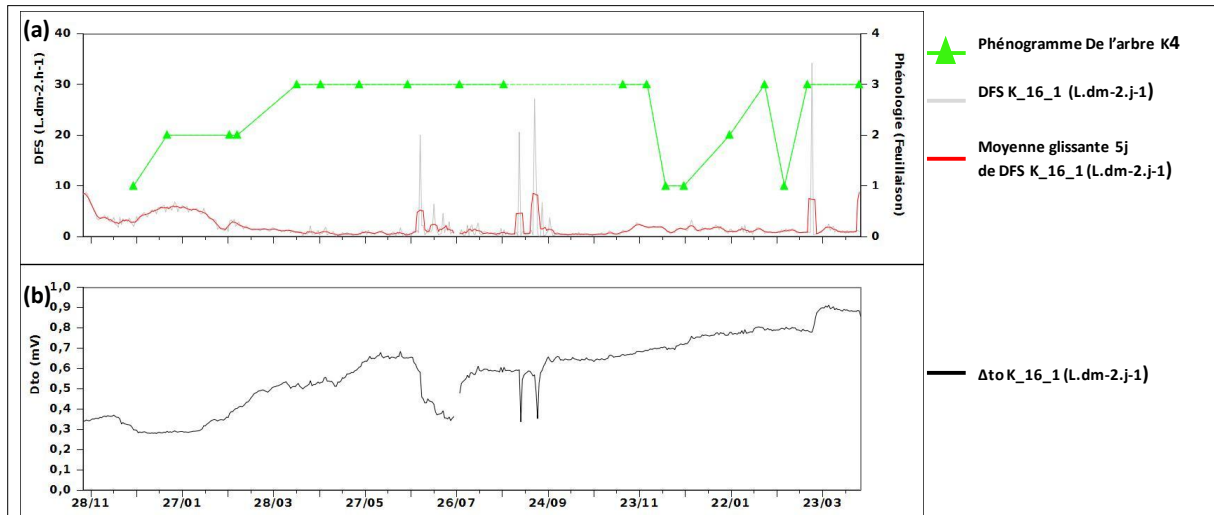
Variations de  $\Delta T_o$  pour les capteurs K-37-1 et K-37-5 (b)

*Observations de terrain* : lors de la tournée de juillet 2009, il n'a pas été remarqué d'anomalies sur le capteur K-37-1 et K-37-5.

*Observations sur les données* : les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur K-37-1 augmentent de 0,32 mV à 0,39 mV du 28/01/09 au 5/04/09 puis diminuent pour se stabiliser entre 0,3 et 0,32mV (Figure 9b). On en conclut que le capteur K-37-1 ne fonctionne plus à partir de cette date. De plus, à partir du 17/12/09, les valeurs de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS, du capteur K-37-1 et du capteur K-37-5 deviennent différentes (respectivement 3,4 et 4,5 l.dm-2.j-1) (Figure 9a), ce qui confirme que la dérive du capteur K-37-1 pourrait même dater du 17/12/09. Les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur K-37-5 sont stables pendant toute la période d'étude. On conclue que le capteur K-37-5 est fonctionnel pendant toute la période d'étude.

*Conclusion* : Depuis le 17/12/09, le capteur K-37-1 est non fonctionnel. La tournée de juillet 2009 n'a pas montré d'expulsion du capteur, ce qui compromet l'hypothèse de dérive du capteur K-37-1 capteur par son expulsion de l'arbre. Aucune données provenant du capteur K-37-1 ne peut être exploitable. Les mesures enregistrées par le capteur K-37-5 sont exploitables du 23/11/08 au 17/04/10.

- Capteur K-16-1



**Figure 10 : Variations de la densité de flux de sève journalière (DFS) pour le capteur K-16-1 ainsi que sa moyenne glissante sur 5 jours et phénogramme (feuillaison) de l'arbre K4 au cours du temps (a)**

**Variations de  $\Delta To$  pour les capteurs K-16-1 au cours du temps (b)**

*Observations de terrain :* lors de la tournée de juillet 2009, il n'a pas été remarqué d'anomalies sur le capteur K-16-1.

*Observations sur les données :* Les valeurs de  $\Delta To$  du capteur K-16-1 sont instables depuis l'installation du capteur : elles augmentent fortement de 0,29 à 0,90 mV (Figure 10b). On en conclut que le capteur K-16-1 est non fonctionnel. Les valeurs inférieures à 1 l.dm-2.j-1 de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS, confirment la dérive du capteur K-16-1 (Figure 10a).

*Conclusion :* Depuis le début de l'installation, le capteur K-16-1 est non fonctionnel. Lors de la tournée de juillet 2009, il n'a pas été remarqué d'expulsion du capteur K-16-1, ce qui compromet l'hypothèse que la dérive de ce capteur est due à son expulsion par l'arbre. Aucune donnée provenant de ce capteur n'est exploitable.

- Capteur K\_15\_1

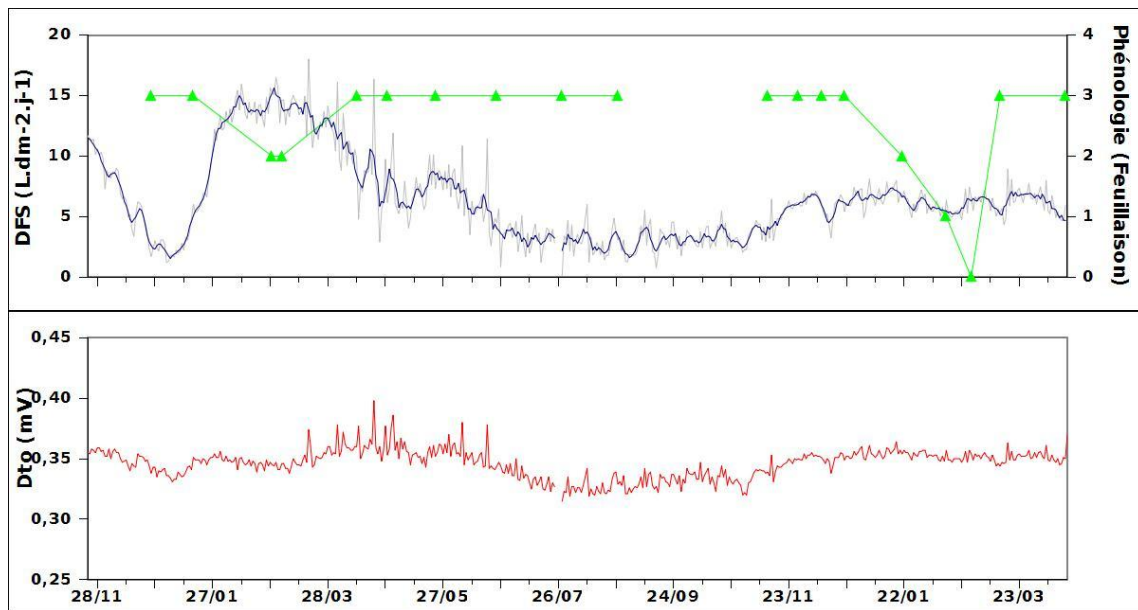


Figure 11 : Variations de la densité de flux de sève journalière (DFS) pour le capteur K-15-1 ainsi que sa moyenne glissante sur 5 jours et phénogramme (feuillaison) de l'arbre K5 au cours du temps (a)

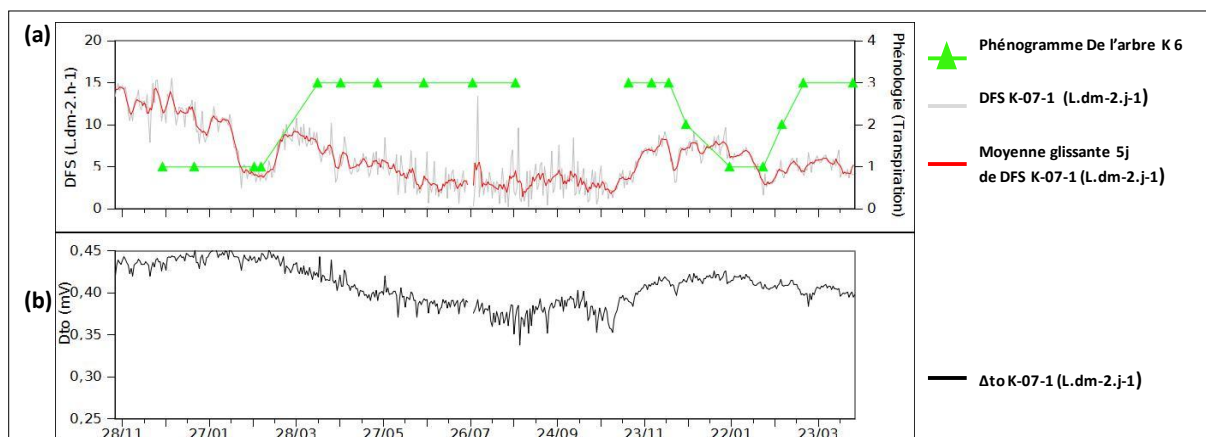
**Variation de  $\Delta T_o$  au cours du temps pour les capteurs K-15-1 (b)**

*Observations de terrain* : lors de la tournée de juillet 2009, il n'a pas été remarqué d'anomalies sur le capteur K-15-1.

*Observations sur les données* : les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur K-15-1 sont stables entre 0,38 et 0,32 mV (voir graphique (b) de la Figure 11). On en conclut que le capteur K-15-1 est fonctionnel. Cependant à partir du 04/03/09, la valeur de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS qui a pour valeur 14 l·dm<sup>-2</sup>·j<sup>-1</sup>, diminue jusqu'à une valeur faible, ne dépassant pas 8 l·dm<sup>-2</sup>·j<sup>-1</sup>.

*Conclusion* : Depuis le 04/03/09, le capteur K-15-1 est non fonctionnel. La tournée de juillet 2009 n'a pas montré d'expulsion du capteur, ce qui compromet l'hypothèse de dérive du capteur K-15-1 capteur par son expulsion de l'arbre. Les mesures enregistrées par le capteur K-15-1 sont exploitables du 23/11/08 au 04/03/09.

- Capteur K-07-1



**Figure 12 : Graphique (a) : Variations de la densité de flux de sève journalière (DFS) pour le capteur K-07-1 ainsi que sa moyenne glissante sur 5 jours et phénogramme (feuillaison) de l'arbre K6 au cours du temps (a)**

**Variations de  $\Delta T_o$  pour le capteur K-07-1 au cours du temps (b)**

*Observations de terrain :* lors de la tournée de juillet 2009, il n'a pas été remarqué d'anomalies sur le capteur K-07-1.

*Observations sur les données :* les valeurs de  $\Delta T_o$  du capteur K-07-1 sont stables entre 0,33 et 0,45 mV (Figure 12b). On en conclut que le capteur K-07-1 est fonctionnel. Cependant à partir du 29/03/09, la valeur de  $I_d$  de la moyenne glissante sur 5 jours de la DFS qui a pour valeur 9,2  $l.dm^{-2}.j^{-1}$ , diminue jusqu'à une valeur faible, ne dépassant pas 6  $l.dm^{-2}.j^{-1}$  (Figure 12a).

*Conclusion :* Depuis le 29/03/09, le capteur K-07-1 est non fonctionnel. La tournée de juillet 2009 n'a pas montré d'expulsion du capteur, ce qui compromet l'hypothèse de dérive du capteur K-07-1 capteur par son expulsion de l'arbre. Les mesures enregistrées par le capteur K-15-1 sont exploitables du 23/11/08 au 29/03/09.

## Conclusion

Ce bilan de fonctionnement a permis de déterminer l'état des capteurs de flux de sève sur :  
l'espèce *Isobertinia doka* :

N° arbre	Nom du capteur	Observations de terrain	Observations sur les données	Fonctionnement du capteur au 17/04/10
1	I-55-1	Capteur expulsé (juillet 2009) Arbre coupé le 17/02/2010	$\Delta$ to instable DFS pas du même de grandeur d'une année sur l'autre	capteur non fonctionnel
	I-55-5	Pas d'anomalies (juillet 2009) Arbre coupé le 17/02/2010	$\Delta$ to stable DFS du même ordre de grandeur d'une année sur l'autre	capteur non fonctionnel
2	I-37-1	Capteur expulsé (juillet 2009)	$\Delta$ to instable DFS pas du même ordre de grandeur d'une année sur l'autre	capteur non fonctionnel
	I-37-5	Pas d'anomalies (juillet 2009)	$\Delta$ to stable DFS du même ordre de grandeur d'une année sur l'autre	capteur fonctionnel
3	I-21-1	Cicatrice sur l'arbre mais capteur non expulsé (juillet 2009)	$\Delta$ to instable DFS pas du même de grandeur d'une année sur l'autre	capteur non fonctionnel
4	I-23-1	Pas d'anomalies (juillet 2009)	DFS faible à partir du 05/03/2009 et valeurs NAN à partir du 29/11/09	capteur non fonctionnel (pas d'enregistrement)
5	I-26-1	Capteur expulsé (juillet 2009)	$\Delta$ to instable l'installation du capteur	capteur non fonctionnel
6	I-12-1	Pas d'anomalies (juillet 2009)	DFS diminuée en pleine feuillaison DFS pas du même ordre de grandeur d'une année sur l'autre	capteur non fonctionnel

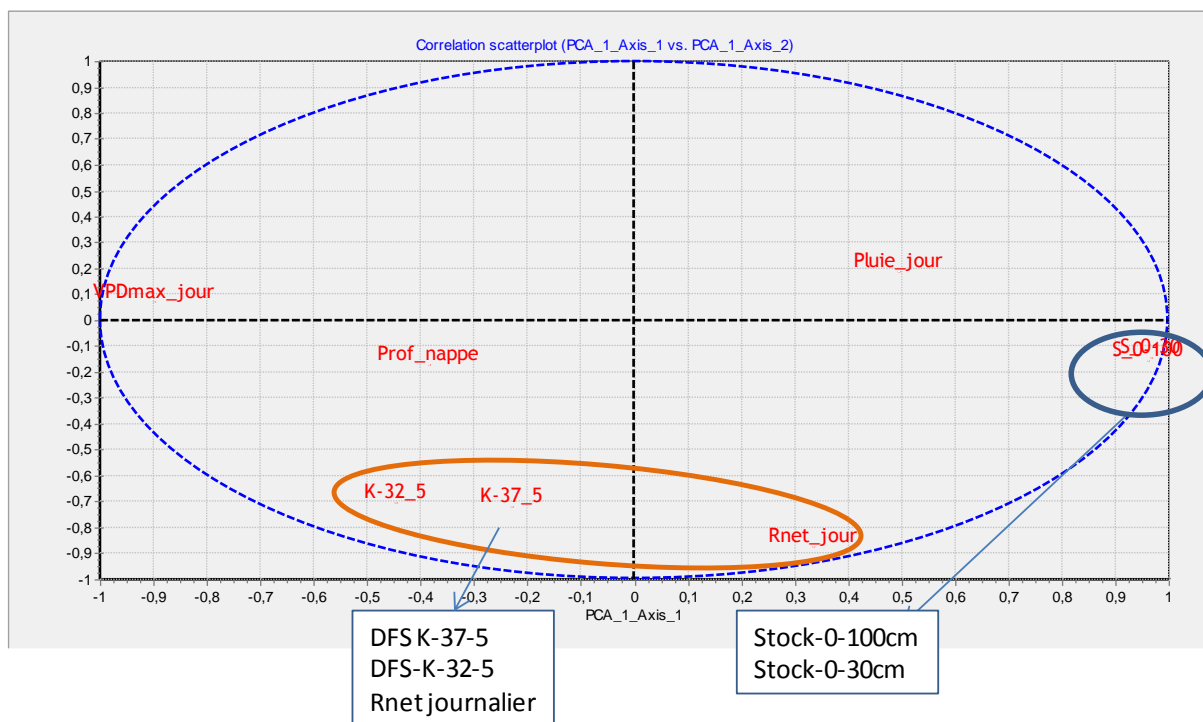
l'espèce *Vitellaria paradoxa* :

N° arbre	Nom du capteur	Observations de terrain	Observations sur les données	Fonctionnement du capteur au 17/04/10
1	K-32-1	Pas d'anomalies (juillet 2009)	$\Delta$ to est stable DFS pas du même ordre de grandeur d'une année sur l'autre	capteur non fonctionnel (pas d'enregistrement)
	K-32-5	Pas d'anomalies (juillet 2009)	$\Delta$ to est stable valeurs NAN à partir du 27/11/09	capteur non fonctionnel
2	K-13-1	Pas d'anomalies (juillet 2009)	$\Delta$ to instable l'installation du capteur	capteur non fonctionnel
3	K-37-1	Pas d'anomalies (juillet 2009)	$\Delta$ to instable DFS du même ordre de grandeur d'une année sur l'autre	capteur fonctionnel
	K-37_5	Pas d'anomalies (juillet 2009)	$\Delta$ to est stable DFS pas du même de grandeur d'une année sur l'autre	capteur non fonctionnel
4	K-16-1	Pas d'anomalies (juillet 2009)	$\Delta$ to instable et valeurs NAN à partir du 29/11/09	capteur non fonctionnel (pas d'enregistrement)
5	K-15-1	Pas d'anomalies (juillet 2009)	$\Delta$ to est stable DFS pas du même ordre de grandeur d'une année sur l'autre	capteur non fonctionnel
6	K-07-1	Pas d'anomalies (juillet 2009)	$\Delta$ to est stable DFS pas du même ordre de grandeur d'une année sur l'autre	capteur non fonctionnel

**Annexe 2 : Résultats de l'ACP1 réalisée avec les données mesurées sur la station de Bira pendant la période de novembre 2008 à décembre 2009.**

	Axe 1		Axe 2		Axe 3	
	Corrélation de la variable à l'axe	Contribution de la variable à l'axe en %	Corrélation de la variable à l'axe	Contribution de la variable à l'axe en %	Corrélation de la variable à l'axe	Contribution de la variable à l'axe en %
VPDmax	-0,901	81%	0,0707	0%	0,2499	6%
Rnet journalier	0,3332	11%	-0,8719	76%	0,0245	0%
Pluie journalière	0,4941	24%	0,1901	4%	-0,4298	18%
Stcok 0-100cm	0,9592	92%	-0,153	2%	0,081	1%
Stock 0-30cm	0,9659	93%	-0,1439	2%	0,0246	0%
DFS K-37-5	-0,2302	5%	-0,7199	52%	0,1353	2%
DFS K-32-5	-0,4481	20%	-0,7032	49%	-0,0804	1%
Profondeur de la nappe	-0,3848	15%	-0,1695	3%	-0,8392	70%
% de la variance totale expliquée par l'axe (% cumulé)	3,4219	43 % (43 %)	1,8868	24 % (66 %)	0,9839	12 % (79 %)

**Tableau 1 : Contributions des axes à l'ACP réalisée avec les données mesurées à la station Bira pendant la période de novembre 2008 à décembre 2009.**

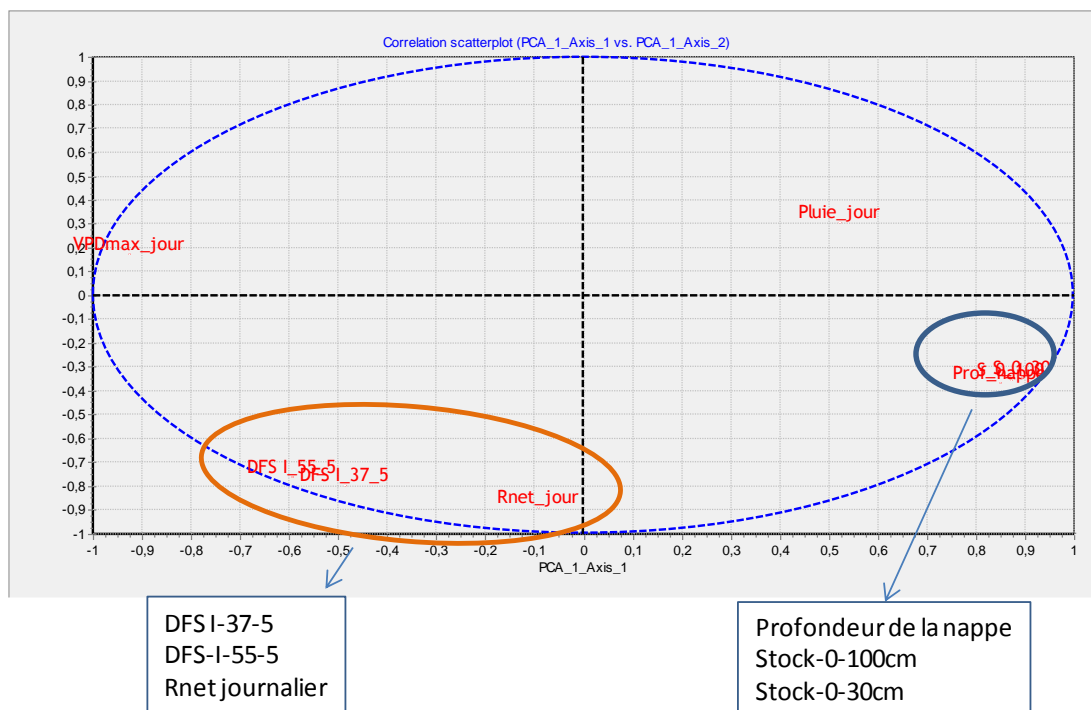


**Figure 1 : Cercle de corrélation des variables réalisé avec les données mesurées à la station Bira pendant la période de novembre 2008 à décembre 2009.**

**Annexe 3 : résultats de l'ACP2 réalisée avec les données mesurées sur la station de Béléfoungou pendant la pleine feuillaison des arbres I1 et I2 comprise dans la période de novembre 2008 à décembre 2009**

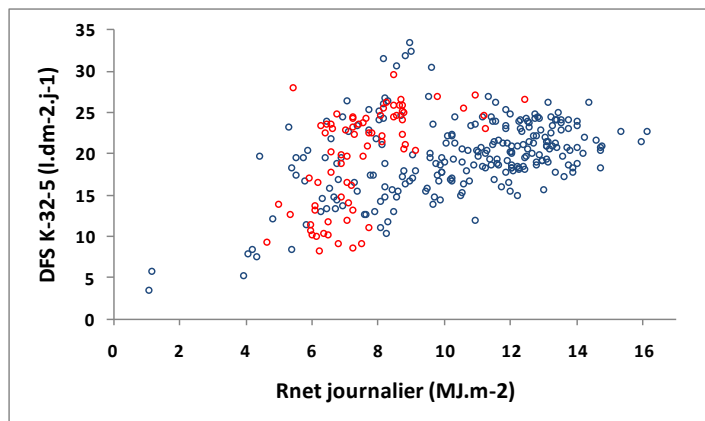
	Axe 1		Axe 2	
	Corrélation de la variable à l'axe	Contribution de la variable à l'axe en %	Corrélation de la variable à l'axe	Contribution de la variable à l'axe en %
VPDmax	-0,9278	86 % (86 %)	0,1724	3 % (89 %)
Rnet journalier	-0,0925	1 % (1 %)	-0,8863	79 % (79 %)
Pluie journalière	0,5213	27 % (27 %)	0,3058	9 % (37 %)
DFS I_55_5	-0,5961	36 % (36 %)	-0,7571	57 % (93 %)
DFS I_37_5	-0,4891	24 % (24 %)	-0,7971	64 % (87 %)
S_0_100	0,8692	76 % (76 %)	-0,3545	13 % (88 %)
S_0_30	0,8932	80 % (80 %)	-0,3451	12 % (92 %)
Profondeur de la nappe	0,8465	72 % (72 %)	-0,3617	13 % (85 %)
% de la variance totale expliquée par l'axe (% cumulé)	4,0055	50 % (50 %)	2,493	31 % (81 %)

**Tableau 1 : Contributions des axes à l'ACP réalisée avec les données mesurées à la station Béléfoungou pendant la période de pleine feuillaison des arbres I1 et I2 incluse dans la période de novembre 2008 à décembre 2009.**

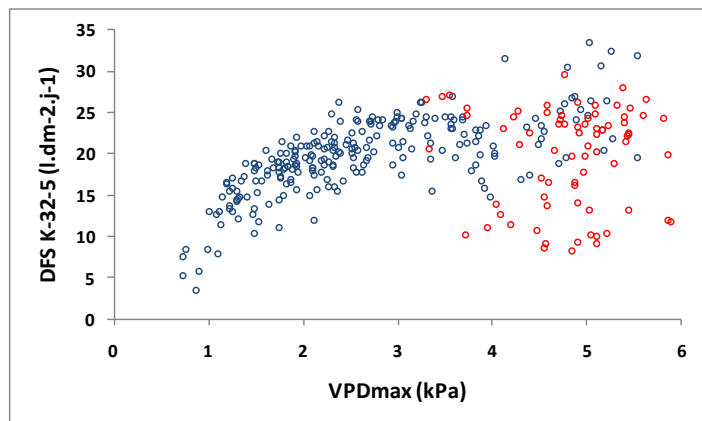


**Figure 1 : Cercle de corrélation des variables réalisée avec les données mesurées à la station Béléfoungou pendant la période de pleine feuillaison des arbres I1 et I2.**

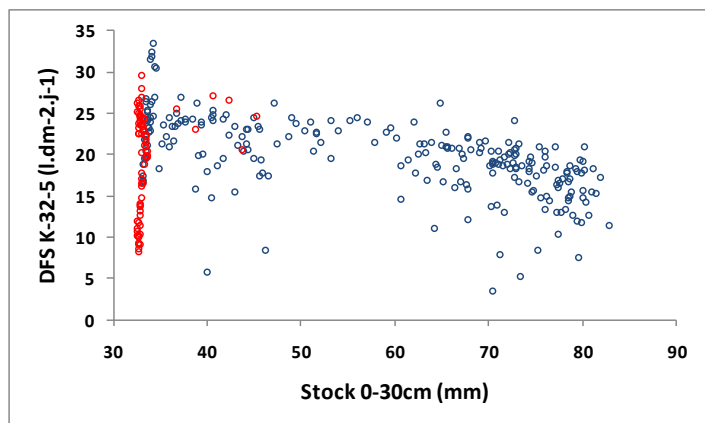
### Annexe 4 : Variations de la DFS du capteur K-32-5 en fonction des paramètres physiques.



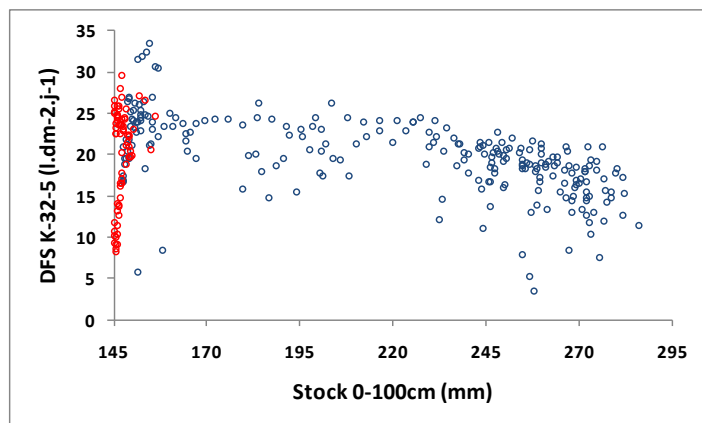
(a)



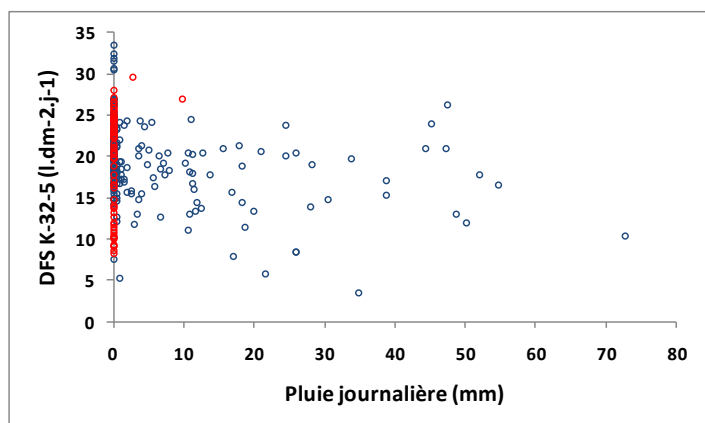
(b)



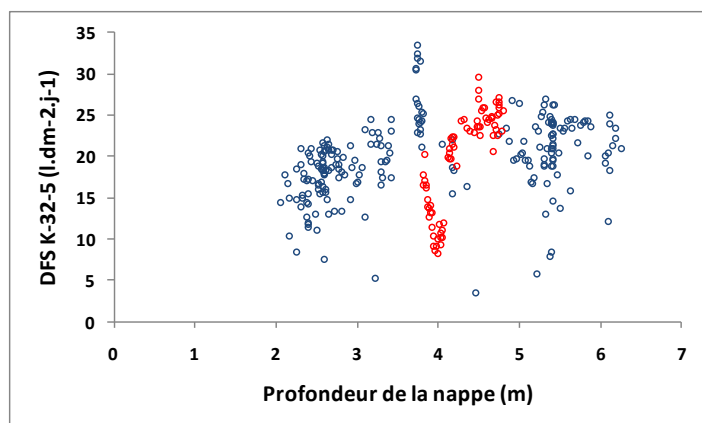
(c)



(d)

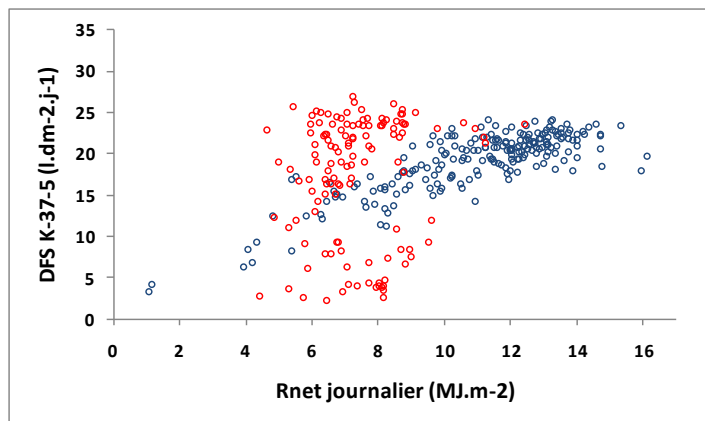


(e)

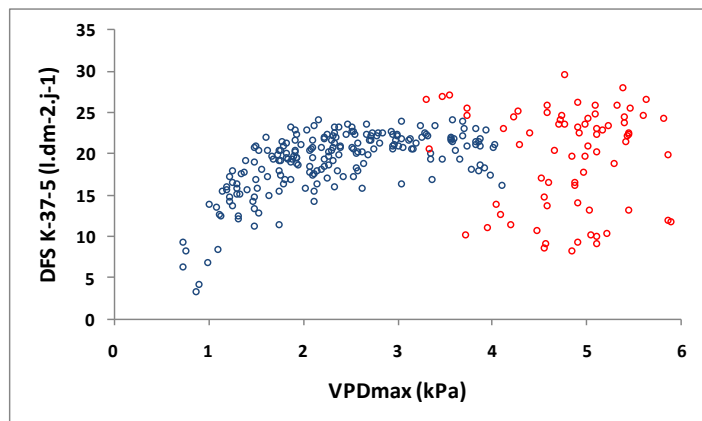


(f)

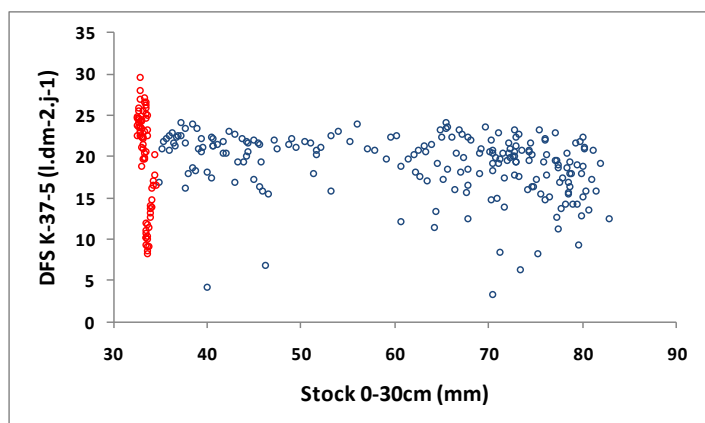
### Annexe 5 : Variations de la DFS du capteur K-37-5 en fonction des paramètres physiques.



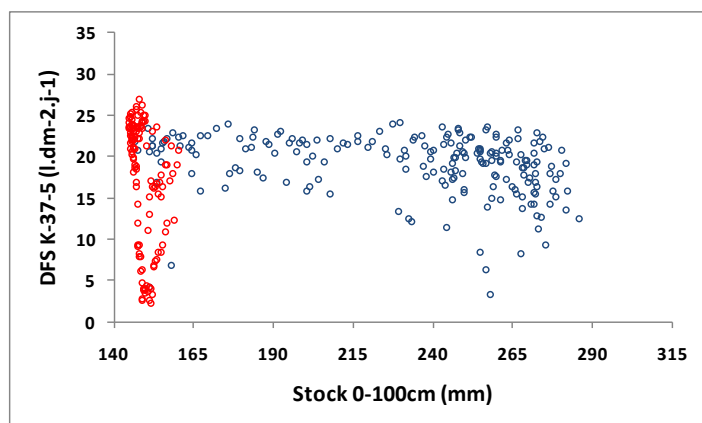
(a)



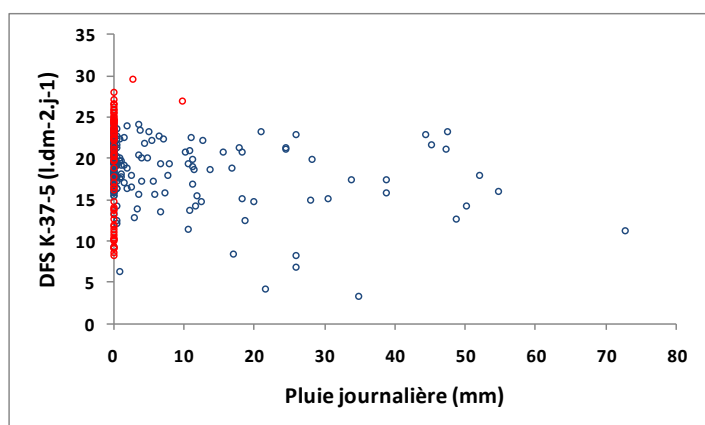
(b)



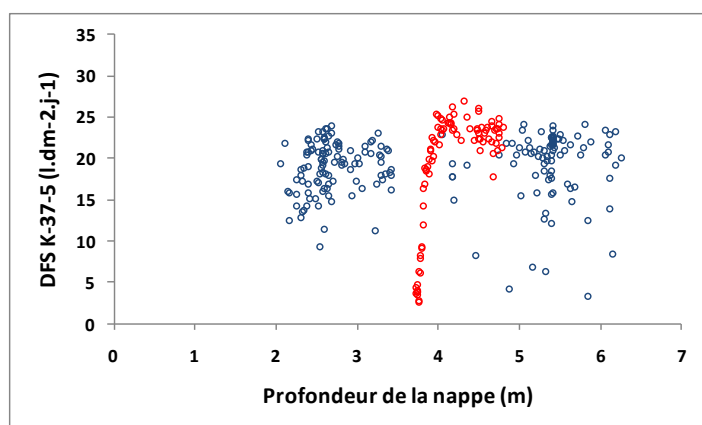
(c)



(d)

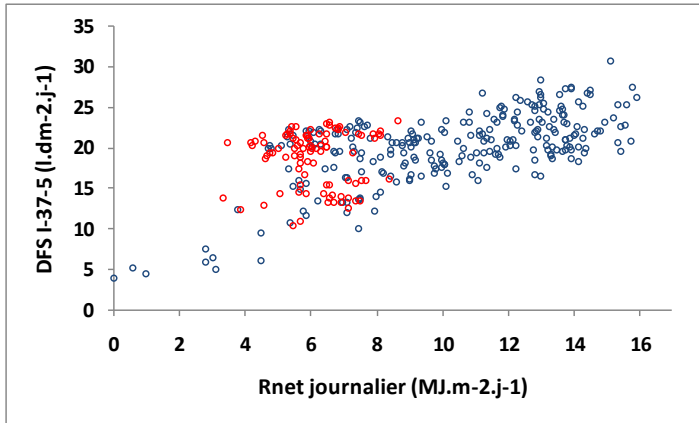


(e)

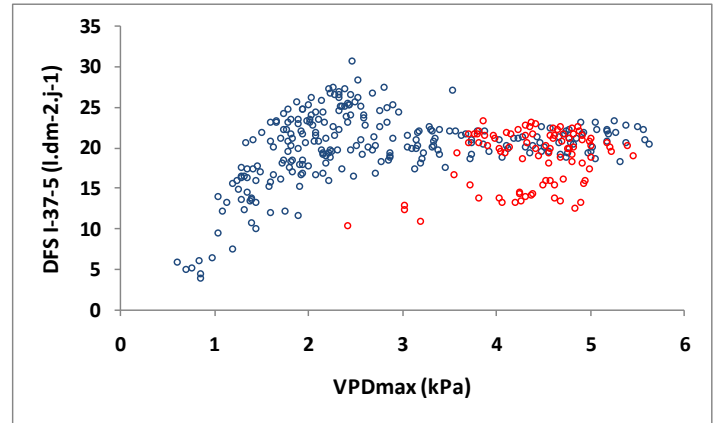


(f)

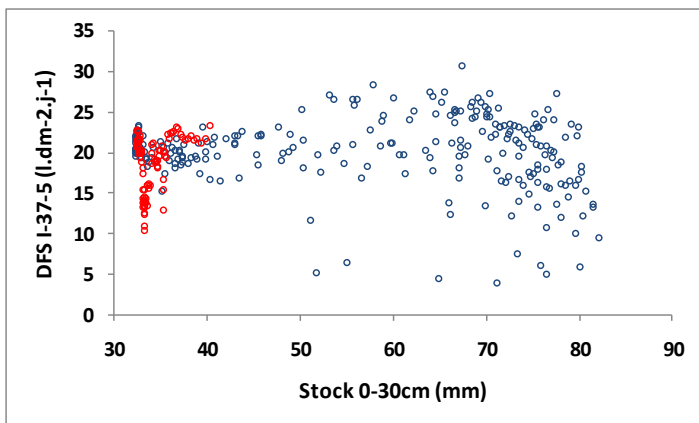
### Annexe 6 : Variations de la DFS du capteur I-37-5 en fonction des paramètres physiques.



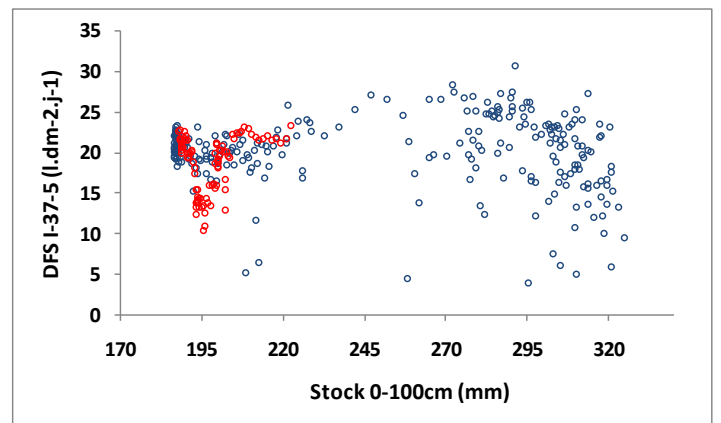
(a)



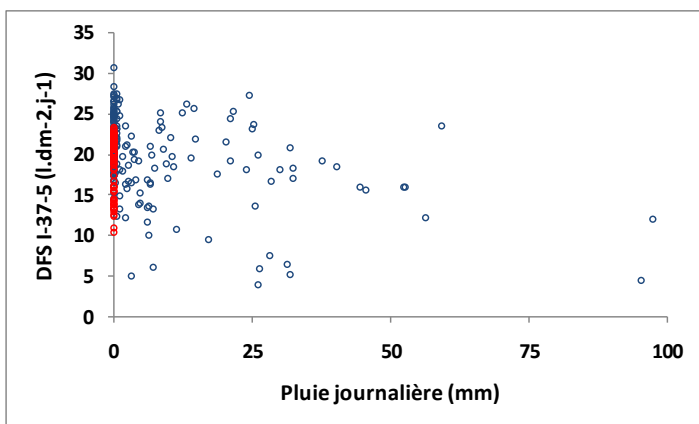
(b)



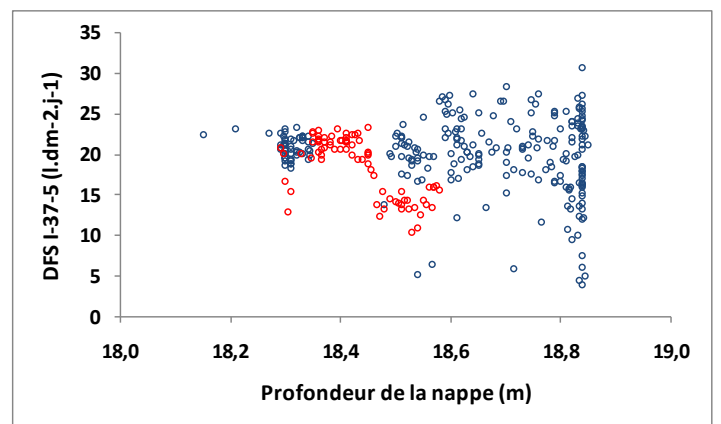
(c)



(d)

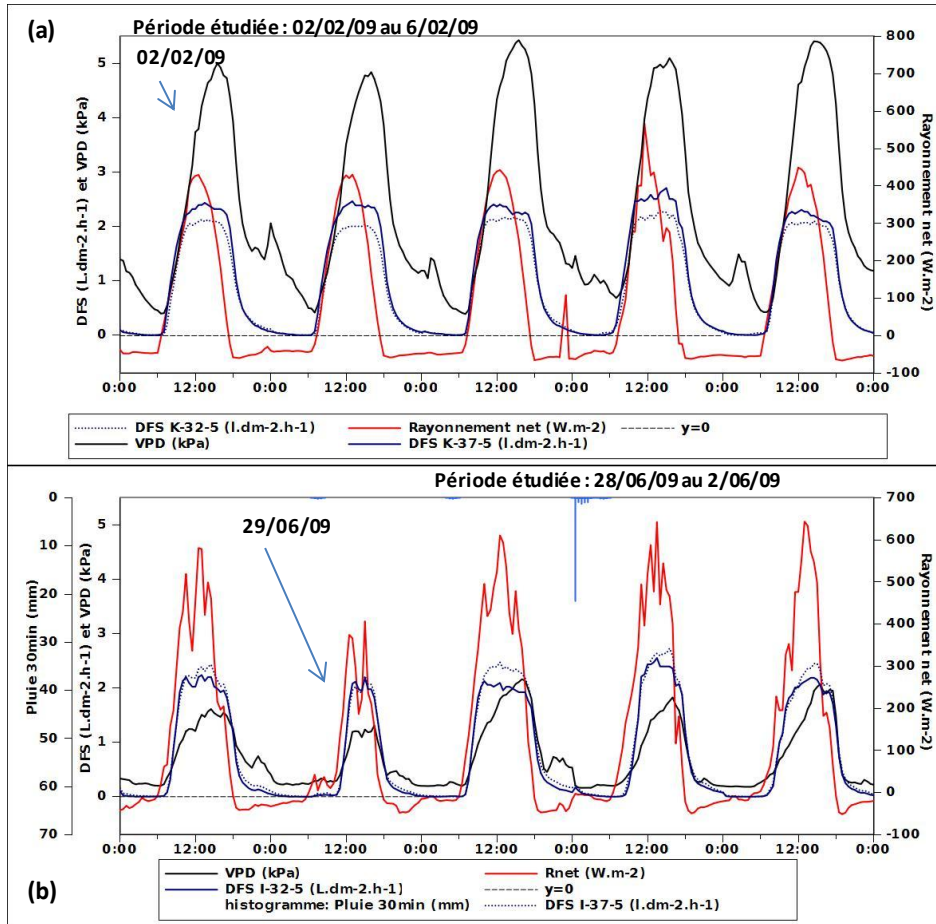


(e)



(f)

**Annexe 7 : DFS des capteurs K-32-5 et K-37-5, du Rnet et du VPD en en fonction temps avec un pas de temps de 30 minutes**



**Figure 1 : Graphiques des variations journalières de la DFS des capteurs K-32-5 et K-37-5, du rayonnement net (Rnet) et du déficit de saturation de l'air (VPD) sur 5 jours en saison sèche (a) et en saison des pluies (b)**

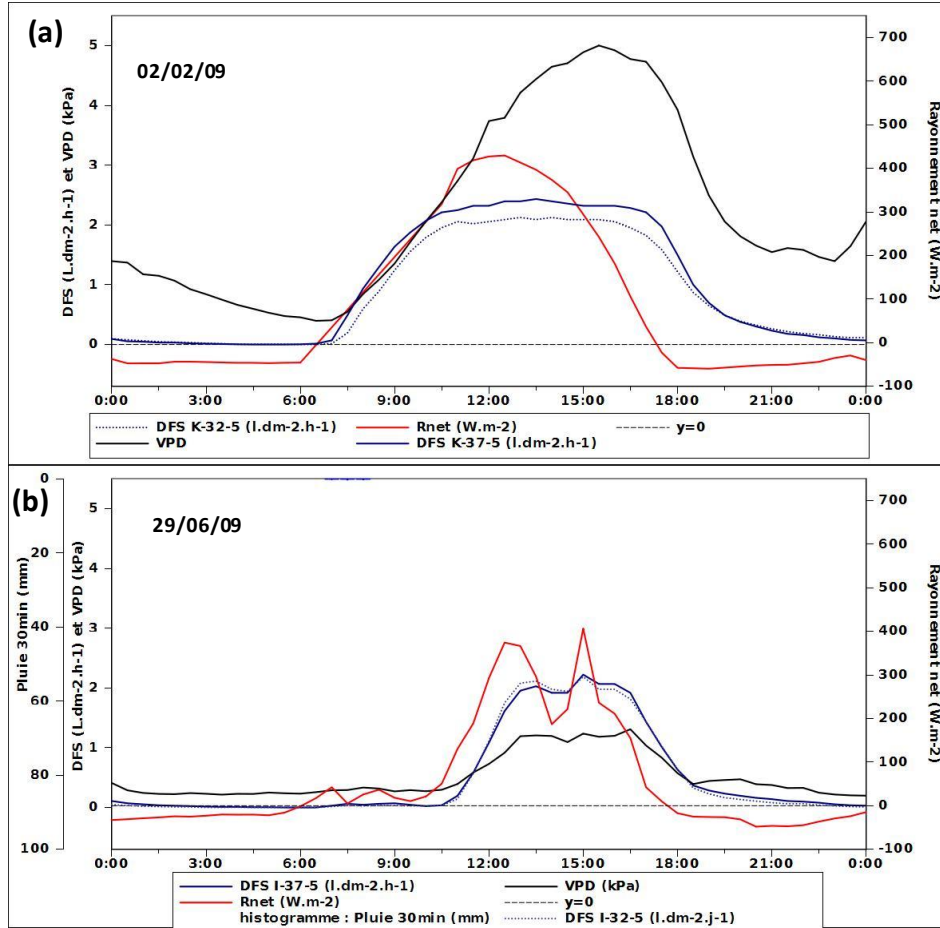


Figure 2 : Variations de la densité de flux de sève (DFS) des capteurs K-32-5 et K-37-2, de Rnet et du VPD pour la journée du 02/02/09 (a) et pour la journée du 29/06/09 (b).