

Chapitre 9

Consommation en eau d'une espèce agroforestière en zone soudanienne

AWESSOU KOHOMLAN G.-B., PEUGEOT C., AGBOSSOU E. ET SEGHIERI J.

Résumé. En zone soudanienne, les cultures sont pratiquées depuis des siècles par les populations rurales sous forme d'agroforesterie. Cette pratique est dominée par les parcs à karités (*Vitellaria paradoxa*), en alternance avec les jachères dans lesquelles les arbres se régénèrent. Pour évaluer les possibilités de densification en karité de ces parcs, nous avons quantifié la transpiration à l'échelle de l'arbre et à celle de la population de karité au sein d'une jachère de dix ans située au nord du Bénin. La densité de flux de sève a été mesurée par la méthode de dissipation thermique transitoire. La transpiration à l'échelle de l'arbre a été déduite de la densité de flux de sève puis extrapolée à celle de la population. Les résultats des trois années d'étude (2011-2013) montrent que la transpiration d'un arbre augmente de 4 à 27 l/jour en fonction de son diamètre (8 à 38 cm). La transpiration varie peu entre la saison des pluies et la saison sèche, suggérant que l'eau n'est pas le facteur limitant. Mais elle diminue brutalement au moment du renouvellement des feuilles (février-mars). À l'échelle de la population de karités, la transpiration reste très faible (0,03 mm/jour) et représente 0,42 % à 1,32 % de la demande atmosphérique estimée par l'évapotranspiration de référence, et 1,15 % de la pluie annuelle. Ces résultats indiquent qu'une augmentation importante de la densité des arbres est possible. Cependant, la seule estimation des besoins en eau des karités reste insuffisante pour améliorer la gestion des parcs agroforestiers et intensifier leur production. Il faudra en effet faire des compromis entre la densification des arbres et l'impact de la lumière incidente filtrée par leur canopée sur la limitation de la production de la culture associée.

Abstract. For centuries, in the Sudanese belt, rural populations have been practicing agroforestry dominated by shea trees (*Vitellaria paradoxa*) parklands as the main farming system alternating with fallows where trees regenerate. To estimate the margin of the tree density increase in shea parklands in northern Benin, we quantified shea transpiration, as indicator of shea water needs, in a 10-year old fallow at the tree and plot scales. Sap flow density (SFD) was measured by the transient thermal dissipation method from which transpiration of the tree was deduced then extrapolated at the shea cover scale. Over the

three-year of the study period (2011-2013), daily tree transpiration increased from 4 to 27 l/day according to tree diameter (8 to 38 cm respectively). Transpiration lowly varied between wet and dry seasons, suggesting that water is not the limiting factor, except a sharp drop during the period of leaves renewal (February-March). Transpiration of the cover was very low (0.03 mm/day), corresponding to 0.42 à 1.32 % of the atmospheric demand estimated by reference évapotranspiration Eto, and 1.15 % of the annual rainfall. These results indicate that an important shea tree density increase is possible. Quantification of shea tree water needs alone will not help to improve parkland management and increase shea production. Trade-offs between trees density and light decrease for crop by tree canopies must be taken into account.

► Introduction

Depuis plusieurs décennies, sous une pression démographique croissante, la zone soudanienne est soumise à une augmentation des superficies cultivées au détriment des jachères et des forêts. Entre 1990 et 2000, elle a connu une diminution de 1,5 million d'hectares de forêt et de 6 millions d'hectares de savane au profit de couverts plus ouverts, principalement des champs et des jachères (Bodart *et al.*, 2013). Les parcs agroforestiers dans lesquels coexistent le karité (*Vitellaria paradoxa*) et le néré (*Parkia biglobosa*) sont très répandus. Ils succèdent aux écosystèmes forestiers (Bayala *et al.*, 2008). Ces parcs sont le résultat de pratiques agricoles millénaires qui associent aux arbres, sur les mêmes parcelles, une ou plusieurs cultures annuelles, principalement le maïs, le sorgho et l'igname. Les noix de karité sont riches en matière grasse et servent à la fabrication du beurre. Elles constituent une source vitale de revenus pour les productrices et alimentent des filières d'exportation plus ou moins organisées et structurées dans plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest dont les principaux sont le Ghana, le Bénin, le Mali et le Burkina Faso. En zone soudanienne, la superficie des parcs à karité est passée de 85 000 ha en 1961 à plus de 600 000 ha en 2016 (Seghieri, 2019). Parallèlement, la densité des karités a diminué drastiquement dans les parcs : de 230 arbres/ha en 1940 (Chevalier, 1946) à 11 arbres/ha en 2003 (Nikiéma *et al.*, 2003). Cette baisse est attribuée à la réduction de la durée des jachères, qui se traduit par la baisse importante du taux de régénération des karités (Nikiéma, 2005).

Une des questions à résoudre, engendrée par l'introduction de la régénération assistée, toujours d'actualité dans plusieurs pays, est celle d'un compromis à faire entre l'augmentation de la densité des arbres pour intensifier la production de fruits et de noix de karité et le risque de compétition pour la lumière, l'eau et les nutriments entre les arbres et les cultures associées (Ong *et al.*, 2014). Ainsi, les agriculteurs privilégient spontanément des densités d'arbres assez faibles, de sorte que cette compétition est largement évitée. Cependant, les connaissances scientifiques du fonctionnement des parcs à karités (impacts des arbres, interactions entre les arbres et les cultures, etc.), les enjeux environnementaux, économiques et sociétaux de l'intensification de leurs productions restent très limitées. En particulier, la connaissance des conditions d'augmentation durable de la production du karité est primordiale pour maintenir les autres « services » fournis par le parc. Dans ce contexte, notre étude a pour objectif de mieux cerner les possibilités de densification des arbres compte tenu de leur consommation en eau et des disponibilités hydriques du milieu.

Concrètement, la transpiration de plusieurs arbres de tailles différentes a été estimée et extrapolée à l'échelle du peuplement spécifique de karités dans une jachère de 10 ans. La transpiration indique la consommation en eau du karité à ces deux échelles. À partir de cette étude de cas, les possibilités de densification d'un parc cultivé à karités susceptible de succéder à la jachère sont évaluées.

Les premiers résultats ont été publiés en 2017 (Awessou *et al.*, 2017). À notre connaissance, auparavant quatre études ont quantifié la consommation en eau du karité, à l'échelle de l'individu ou du peuplement. Compaoré (2006) a estimé la transpiration du karité, espèce dominante dans un couvert ligneux multi-spécifique au Ghana (Navrongo). Bayala *et al.* (2008) ont estimé la transpiration à l'échelle de l'arbre dans un parc agroforestier à karités au Burkina-Faso. Ils ont mis en évidence l'existence d'une redistribution hydraulique, c'est-à-dire la remontée verticale de l'eau des horizons profonds et plus humides du sol à travers le système racinaire des arbres et son relargage dans les horizons de surface plus secs au bénéfice des arbres et des cultures associées. Tia (2008) a estimé la transpiration du karité à l'échelle de l'arbre et de la population, dans une étude localisée au sud-ouest du Burkina-Faso. Il a ensuite évalué, par modélisation, la contribution du karité à l'évapotranspiration du peuplement ligneux multispécifique. Au cours d'une étude conduite au Burkina Faso (Gonsé), Bayala *et al.* (2009) ont comparé la variation saisonnière de la transpiration de jeunes plants de karité âgés de 8 ans provenant du Burkina Faso, du Mali et du Sénégal.

► Matériels et méthodes

Le site expérimental

L'étude a été réalisée sur le bassin versant de la Donga, Bénin (fig. 9.1), à 450 km au nord-ouest de Cotonou (9°40' - 9°54'N, 1°34' - 1°58' E; fig. 9.1a). Dans ce site, la saison des pluies s'étend d'avril à octobre, la pluviométrie moyenne était de 1200 mm/an de 1950 à 2005. Comme à l'échelle régionale, la superficie des forêts claires est passée de 60 % en 1973 à moins de 40 % en 2000 dans ce bassin au profit des surfaces cultivées (+ 12,5 %) et des jachères (+ 6 %) (Leroux, 2012). Dans la zone d'étude, le karité domine largement le couvert ligneux dans les parcs agroforestiers et les jachères.

Le site expérimental est une jachère de 10 ans d'environ 1,8 ha composée d'herbacées annuelles et pérennes, d'arbustes et d'arbres de plusieurs espèces avec une dominance net en karités, évaluée grâce à un inventaire préalable (fig. 9.1b).

Le dispositif et la méthode d'estimation de la transpiration

La jachère étudiée est constituée de neuf espèces végétales selon notre inventaire réalisé en 2013. Seuls les karités (espèce dominante de la jachère) ont été instrumentés pour la mesure de la transpiration. Ainsi, le couvert spécifique fait référence au couvert du karité considéré dans ce cas comme un couvert « pur » de karités.

L'estimation de la transpiration du karité est réalisée à partir d'un échantillon de 5 arbres dont les dimensions sont représentatives de la gamme des dimensions

mesurées lors de l'inventaire (tab. 9.1). Le flux de transpiration d'un arbre est estimé à partir de la densité de flux de sève exprimée en litres par unité de surface d'aubier (partie du tronc dotée de vaisseaux fonctionnels) et par jour (l/dm²/j). L'intégration de la densité de flux de sève sur la surface d'aubier fournit la transpiration à l'échelle de l'arbre.

La densité de flux de sève est estimée par la méthode de dissipation thermique transitoire proposée par Do et Rocheteau (2002) et Isarangkool Na Ayutthaya *et al.* (2010). Elle est dérivée de la méthode à chauffage continu de Granier (1985) : la différence de température est mesurée en continu entre une sonde chauffée insérée dans l'aubier à hauteur de poitrine et une sonde inerte insérée à 5 cm plus bas. Les données sont stockées dans une centrale d'acquisition Campbell.

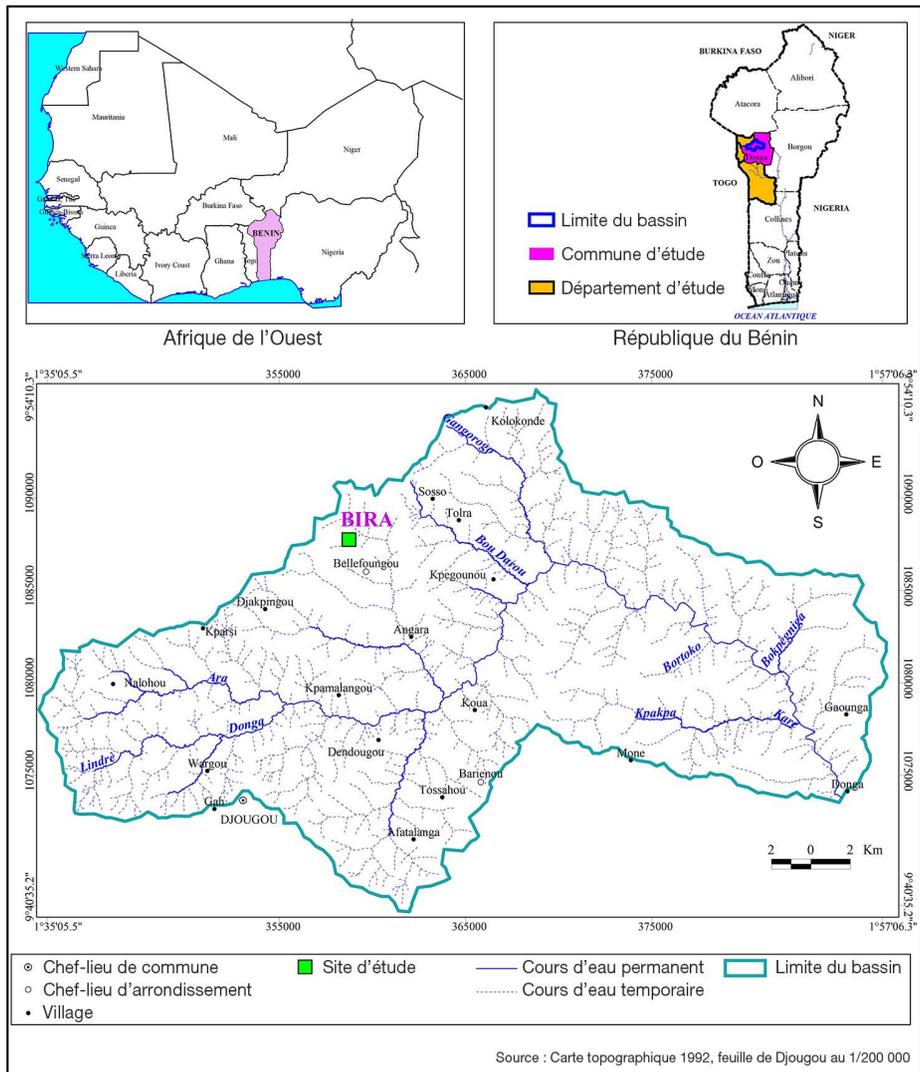


Figure 9.1a. Localisation du site d'étude : Bassin versant de la Donga.



Figure 9.1b. Jeune jachère de Bira. (© Marie Bellanger)

Le flux de sève ascendant dissipe la chaleur produite par la sonde chauffée et réduit la température dans son voisinage. Par conséquent, plus grande est la différence entre les deux sondes, plus faible est la densité de flux de sève. Dans la méthode transitoire, les phases de chauffage (10 minutes) alternent avec celles de refroidissement (20 minutes). Le chauffage discontinu permet de corriger le biais lié aux conditions extérieures qui peut conduire à des erreurs importantes dans l'estimation du flux de sève (Do et Rocheteau, 2002). Un étalonnage valable pour toutes les espèces permet de déduire la densité de flux de sève du différentiel de température (Do et Rocheteau, 2002).

La densité de flux de sève décroît de la périphérie vers le centre de l'aubier à cause de la diminution des propriétés conductrices de l'aubier du fait de la production de bois mort au centre du tronc (Jiménez *et al.* 2000; Nadezhdina *et al.*, 2002). Ce profil radial de la densité de flux de sève est pris en compte pour éviter, là encore, des biais importants dans l'estimation de la transpiration (Nadezhdina *et al.*, 2002). Lorsque toute la profondeur de l'aubier n'est pas explorée par les sondes, un facteur de correction est appliqué aux mesures (Awessou *et al.*, 2017). La surface d'aubier d'un arbre est déduite des mesures de son épaisseur obtenue par des carottages dans le tronc à hauteur de poitrine et parallèlement au sol à l'aide d'une tarière de Pressler.

Plusieurs sondes ont été implantées à différentes profondeurs sur les deux plus gros arbres de notre échantillon (diamètre à hauteur de poitrine, DHP > 30 cm, tab. 9.1), de sorte à intégrer toute l'épaisseur d'aubier. Pour les trois autres arbres plus petits, seule la partie externe de l'aubier, où la densité de flux de sève est maximale, a été instrumentée. La transpiration des deux plus gros arbres est le produit de la densité de flux de sève externe, corrigée par la surface totale de l'aubier afin de prendre en compte le profil radial (Awessou *et al.*, 2017). La transpiration des trois plus petits arbres est calculée directement par le produit de la densité de flux de sève externe et la surface totale d'aubier.

Pour estimer la transpiration de la population ou le couvert de karité de la parcelle¹, la transpiration estimée sur chacun des cinq arbres a été extrapolée à tous les individus inventoriés en faisant les hypothèses suivantes :

- les individus de même diamètre ont la même surface d'aubier (Pataki et Oren, 2003; Kumagai *et al.*, 2007);
- les cinq arbres échantillonnés représentent suffisamment bien le peuplement de karité.

L'inventaire a permis de dénombrer 17 arbres/ha. Leur surface totale d'aubier a été estimée à 0,11 m²/ha. La densité de flux de sève moyenne, calculée sur les cinq arbres instrumentés, est extrapolée à l'échelle de la population de karité selon l'équation ci-dessous :

$$\text{Tr couvert} = J_s \times A_s / A_g$$

Tr couvert (mm/jour) est la transpiration de la population de karité sur la parcelle.

J_s (l/m²/jour) est la densité de flux de sève (DFS) moyenne des cinq arbres instrumentés, calculée comme la somme de la transpiration des cinq arbres divisée par la somme de leurs surfaces d'aubier. Au préalable, il a été vérifié que la relation entre la transpiration à l'échelle de l'arbre et le diamètre de l'arbre est linéaire de 1^{er} ordre.

A_s (m²) est la surface de bois d'aubier de tous les karités de la parcelle.

A_g (m²) est la surface de la parcelle (m²).

La demande évaporatoire de l'atmosphère, qui est le déclencheur du processus de transpiration, a été approchée par l'évapotranspiration de référence (E_o) calculée à l'aide de la formule de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

► Résultats et discussion

La densité de flux de sève

Quel que soit l'arbre considéré — et comme attendu —, la densité de flux de sève augmente rapidement dès le lever du soleil. Sa valeur maximale est atteinte entre 12 et 15 h (UTC, fig. 9.2). Puis, elle diminue et devient nulle entre 18 h et 6 h (fig. 9.2). La densité de flux de sève d'un arbre est toujours un peu plus élevée en saison des pluies qu'en saison sèche (tab. 9.1 et fig. 9.2).

Sur la période d'étude (2011-2013), la densité de flux de sève varie d'un arbre à l'autre de 5 à 11 l/dm²/jour pour des diamètres allant de 8,3 à 38,2 cm (tab. 9.1). La densité de flux de sève de l'arbre «V.p3» est inférieure à celle de l'arbre «V.p1», malgré un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et une surface d'aubier plus grands. Une différence comparable est observée entre les arbres «V.p2» et «V.p8».

Cette variation interindividuelle de la densité de flux de sève est sans doute à relier à la variation de la conductivité hydraulique. Celle-ci est fonction, d'une part, du diamètre et de la densité des vaisseaux du xylème (Tateishi *et al.*, 2008) et, d'autre

1. Le couvert de karité sous-entend la population de karités dans la jachère. Le karité étant une espèce naturelle, les individus sont dispersés dans la jachère. Son couvert représente donc l'ensemble des karités dans la jachère. Sur le site d'étude, nous avons dénombré 17 arbres/ha. Les valeurs de transpiration qui sont données dans la suite du document ne concernent que la transpiration de la population de karités et non la transpiration du peuplement de la jachère.

Tableau 9.1. Caractéristiques structurales des arbres échantillonnés.

Code arbre	DHP (cm)	R (cm)	Surface (dm ²)	Nb capteurs	Flux de sève (l/dm ² /jour)		Tr arbre (l/jour)		Tr karités (mm/jour)	
					SP	SS	SP	SS	SP	SS
Vp1	32,5	4,0	3,5	5	7,7±3,3	7,5±3,6	27,3±11,6	26,3±12,5		
Vp2	14,7	3,0	1,1	1	6,6±3,7	5,8±2,6	7,4±4,1	6,6±3,0		
Vp3	38,2	4,5	4,7	5	4,7±2,9	4,6±2,8	22,3±13,9	21,7±13,1	0,029±0,01	0,026±0,01
Vp8	15,0	3,0	1,0	2	10,6±4,7	7,4±3,6	11,0±4,9	7,7±3,7		
Vp10	8,3	3,5	0,7	1	7,5±5,1	5,1±3,2	5,3±3,6	3,6±2,3		

DHP : diamètre du tronc à hauteur de poitrine. Flux de sève : densité de flux de sève moyenne par arbre. Tr arbre : transpiration à l'échelle de l'arbre. Tr karités : Transpiration à l'échelle de la population de karités. SP : saison des pluies. SS : saison sèche

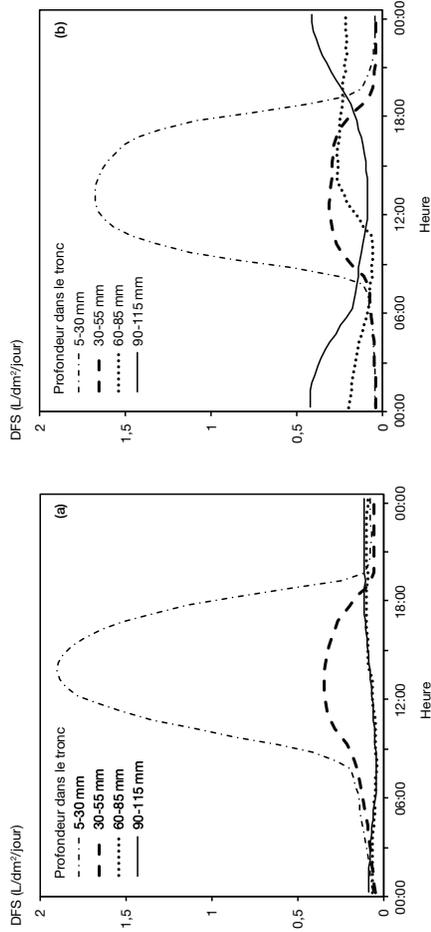


Figure 9.2. Dynamique journalière de la densité de flux de sève (DFS) horaire moyenne de 2011 à 2013) à différentes profondeurs du tronc de karité de diamètre 32,5 cm pour une journée en saison des pluies (a) et une journée en saison sèche (b).

part, du rapport entre la surface foliaire et celle de l'aubier (West *et al.*, 1999; Issoufou *et al.*, 2015). La résistance hydraulique existant entre le sol et la canopée peut également avoir une influence car elle varie en fonction de la hauteur de l'arbre et de la perméabilité de l'aubier (Venkatraman et Ashwath, 2016). Enfin, l'état sanitaire et la vigueur des arbres, en lien avec leur âge plus ou moins avancé, peuvent influencer l'état des vaisseaux, et donc la transpiration.

La transpiration

À l'échelle de l'arbre et à celle du couvert, la transpiration chute brutalement en février-mars, période correspondant au renouvellement des feuilles (fig. 9.3b). Nos observations phénologiques montrent que cette défeuillaison concerne environ 50 % de la canopée.

Une tendance à la baisse de la transpiration de la population de karité entre 2011 et 2013 s'observe sur la figure 9.3c et sur les valeurs normées par la demande atmosphérique (Eto) (fig. 9.3d). Cette tendance est attribuée à un artefact généré par la mise en place par l'arbre de tissus cicatriciels autour des capteurs en réaction à l'insertion des sondes. Cette réaction bien connue (Wiedemann *et al.*, 2016) modifie les propriétés thermiques du bois et semble particulièrement forte sur les karités étudiés ici. Elle induit une sous-estimation des valeurs absolues du flux de sève dans les 2 à 3 ans qui suivent l'installation des sondes. En l'absence de données physiques de ce phénomène, nous n'étions pas en mesure de corriger cette dérive.

Intensité de la transpiration moyenne journalière d'un arbre

Au cours des trois années d'étude et sur les cinq arbres instrumentés, l'intensité de la transpiration moyenne journalière d'un arbre varie de 4 à 27 l/jour et augmente de façon linéaire avec son diamètre ($R^2 = 0,87$, p-value < 0,0001). Elle est à peine plus intense en saison des pluies qu'en saison sèche (tab. 9.1).

Ce résultat est différent de celui de Compaoré (2006) sur un karité de 42 cm de diamètre dont la transpiration a été estimée à 79 l/jour en début de saison sèche, et presque la moitié (32 l/jour) en fin de saison sèche.

Par ailleurs, Bayala *et al.* (2008) ont estimé à 121 l/jour la transpiration moyenne annuelle d'un arbre de 64 cm de diamètre situé dans un parc cultivé. Ce résultat est cohérent avec le sens de la relation que nous avons obtenue entre la transpiration et le diamètre du tronc. Néanmoins, la valeur de la transpiration est supérieure à celle prédite par la relation obtenue dans notre étude pour un arbre de ce diamètre. Situés dans un parc agroforestier, les karités instrumentés par Bayala *et al.* (2008) sont soumis à une compétition pour les ressources probablement moins intense que dans la jachère que nous avons étudiée. En effet, dans la plupart des cas, la densité des arbres dans les parcs est plus faible qu'en jachère (Picasso, 1984). De plus, les arbres des parcs ont pu bénéficier des amendements apportés par les paysans par l'intermédiaire de la culture associée. Ces arbres sont ainsi plus vigoureux.

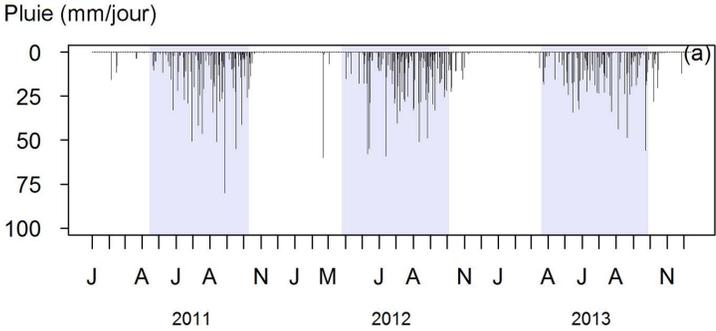


Figure 9.3a.
Variation saisonnière de la pluviométrie

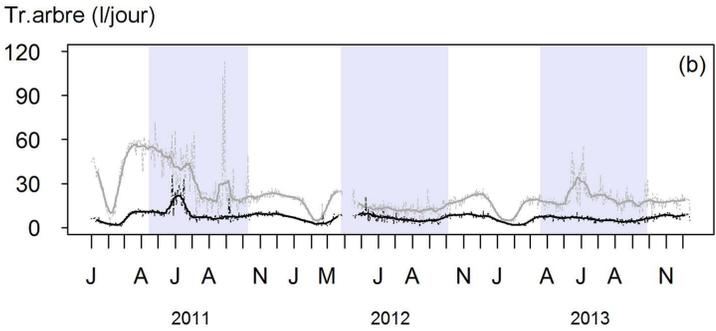


Figure 9.3b.
Variation saisonnière de la transpiration de l'arbre de karité *Vitellaria paradoxa* 1 (V.p1, gris) et V.p2 (noir).

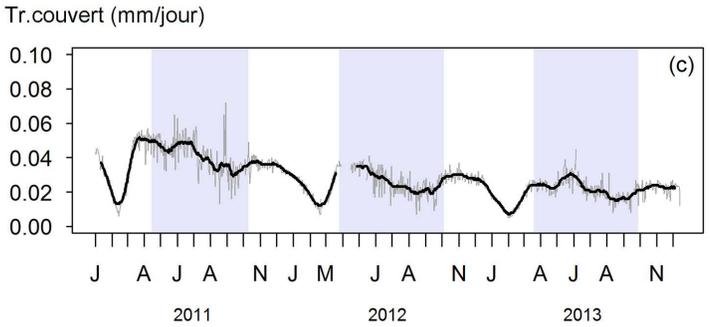


Figure 9.3c.
Variation saisonnière de la transpiration de la population de karité (Tr couvert).

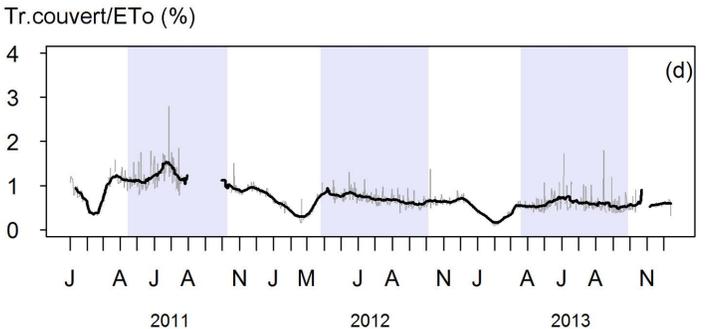


Figure 9.3d.
Variation saisonnière du ratio Tr couvert / Eto (%).

Figure 9.3. Variation saisonnière sur les trois années (2011-2013) d'étude dans la jachère de Bira au nord-ouest du Bénin. Les bandes verticales délimitent les saisons des pluies; b-d : données journalières (ligne fine) et moyenne glissante sur 21 jours (ligne épaisse).

L'intensité de la transpiration à l'échelle de la population de karités

L'intensité de la transpiration à l'échelle de la population de karités a été estimée au cours des premiers mois de l'installation (2011), afin qu'elle ne soit pas affectée par les phénomènes de cicatrisation. Elle varie de 0,01 à 0,07 mm/jour, avec une moyenne de 0,028 ($\pm 0,011$) mm/jour (fig. 9.3c et tab. 9.1). Elle est significativement plus élevée en saison des pluies qu'en saison sèche (t - test; $t = 4,28$; $p < 0,0001$), bien que faiblement; comme l'est la transpiration moyenne journalière d'un arbre (tab. 9.1). La faible différence observée entre les deux saisons suggère que la disponibilité en eau du sol n'est jamais limitante au cours de l'année. Plusieurs mécanismes intrinsèques au karité tels que le stock interne d'eau du xylème, l'anatomie et la physiologie du xylème pourraient également contribuer à expliquer la relative stabilité de sa transpiration (Eamus *et al.*, 2000).

Les valeurs de la transpiration de la population de karités en 2011 correspondent à 0,42 à 1,32 % de la demande atmosphérique Eto (fig. 9.3c et fig. 9.3d). Au cours des trois années d'étude et en dehors des périodes de renouvellement des feuilles, la variation du rapport Tr/Eto reste également faible (Tr est la transpiration de la population de karités sur la parcelle), y compris en saison sèche (avril 2011, novembre-décembre 2011 et 2012). Cette stabilité confirme que la transpiration est principalement sous le contrôle de la demande atmosphérique, pas vraiment sous celui de la disponibilité en eau du sol. Au cours d'une année, la transpiration de la population de karités représente seulement 1,15 % de la pluie annuelle. D'après des études menées en station de recherche agronomique, Ong et Leakey (1999) indiquent que la transpiration peut représenter 30 à 45 % des précipitations annuelles dans un système agroforestier bien géré.

►► Conclusion

À partir du couvert de la jachère que nous avons étudiée, la marge d'augmentation de la densité de la population de karité est potentiellement élevée. Compte tenu des pratiques agricoles encore extensives en Afrique soudano-sahélienne, la culture associée ne risque pas de consommer l'eau à hauteur des proportions indiquées par Ong et Leakey (1999). Ainsi, même multipliée par trois, la densité des karités (17 arbres/ha) aurait probablement peu d'impact sur la consommation en eau de l'ensemble de la couverture végétale à l'échelle de la parcelle. Cependant, l'augmentation de la densité des arbres conduit à limiter la production de la culture associée par la diminution de son accès à la lumière à cause du feuillage des arbres. C'est ce compromis qui doit être optimisé pour une intensification durable de la production des parcs à karité. La consommation en eau des cultures annuelles en parc et des graminées spontanées en jachère n'a pas été abordée dans notre étude, ni dans cet ouvrage. En revanche, l'effet du karité en parc sur la fertilité du sol (carbone et nutriments) et sur le rendement de la culture associée est abordé dans le chapitre 10.

► Bibliographie

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO.
- Awessou K.G.B., Peugeot C., Rocheteau A., Seguis L., Do F.C., Galle S., Bellanger M., Agbossou E., Seghieri J., 2017. Differences in transpiration between a forest and an agroforestry tree species in the Sudanian belt. *Agroforestry systems*, 91: 403-413. Doi: 10.1007/s10457-016-9937-8.
- Bayala J, Ouédraogo S.J., Ong C.K., 2009. Early growth performance and water use of planted West African provenances of *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn (karité) in Gonsé, Burkina Faso. *Agroforestry systems*, 75: 117-127.
- Bayala J., Heng L.K, van Noordwijk M., Ouedraogo S.J., 2008. Hydraulic redistribution study in two native tree species of agroforestry parklands of West African dry savanna. *Acta oecologica*, 34: 370-378.
- Bodart C, Brink A.B., Donnay F, Lupi A., Mayaux P, Achard F., 2013. Continental estimates of forest cover and forest cover changes in the dry ecosystems of Africa between 1990 and 2000. *Journal of biogeography*, 40: 1036-1047.
- Chevalier A., 1946. L'arbre à beurre d'Afrique et l'avenir de sa culture. *Oléagineux*, 1: 7-1.
- Compaoré H., 2006. The impact of savannah vegetation on the spatial and temporal variation of the actual evapotranspiration in the Volta Basin, Navrongo, Upper East Ghana. *Ecology and development series*, 36: 1-155.
- Do F., Rocheteau A., 2002. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of non-continuous heating system. *Tree physiology*, 22: 649-654.
- Eamus D., O'Grady A.P., Hutley L.B., 2000. Dry season conditions determine wet season water use in the wet-dry tropical savannas of northern Australia. *Tree physiology*, 20: 1219-1226.
- Granier A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annals of forest science*, 42: 193-200.
- Isarangkool Na Ayutthaya S., Do F.C., Pannengpetch K., Junjittakarn J., Maeght J.L, Rocheteau A., Cochard H., 2010. Transient thermal dissipation method of xylem sap flow measurement: multi-species calibration and field evaluation. *Tree physiology*, 30: 139-148.
- Issoufou H. B.-A., Rambal S., Le Dantec V., Oi M., Laurent J.P., Saadou M., Seghieri J., 2015. Is the WBE model appropriate for semi-arid shrubs subjected to clear cutting? *Tree physiology*. 35: 197-208.
- Jiménez M.S., Nadezhdina N., Cermak J., Morales D., 2000. Radial variation in sap flow in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. *Tree physiology*, 20: 1149-1156.
- Kumagai T., Aoki S., Shimizu T., Otsuki K., 2007. Sap flow estimates of stand transpiration at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed. *Tree physiology*, 27: 161-168.
- Leroux L., 2012. Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'Ouémé (Bénin) à partir de l'imagerie Landsat et Modis : cas d'étude de la commune de Djougou. Rapport interne, projet ANR-Escape. <https://www.locean-ipsl.upmc.fr/~ESCAPE/Livrables/D1.3c.pdf>, (consulté le 20 mars 2019).
- Nadezhdina N., Cermák J., Ceulemans R., 2002. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors. *Tree physiology*, 22: 907-918.
- Nikiéma A., 2005. Agroforestry parkland species diversity: uses and management in semi-arid West Africa (Burkina Faso). Thèse de doctorat, Wageningen University, Pays-Bas. ISBN : 90-8504-168-6.
- Nikiéma A., Van Der Maesen L.J.G., Hall J.B., 2003. The impact of parkland management practices on plant resources diversity. In: Teklehaimanot Z. (éd.). Improved management of agroforestry parkland systems in Sub-Saharan Africa. EU/Inco Project Contract IC18-CT98-0261. Third annual progress report, Bangor, Royaume-Uni, University of Wales.
- Ong C.K., Leakey R.R.B., 1999. Why tree-crop interactions in agroforestry appear at odds with tree-grass interactions in tropical savannas. *Agroforestry systems*, 45: 109-129.

- Ong C., Black C.R., Wilson J., Muthuri C., Bayala J., Jackson N.A., 2014. Agroforestry: hydrological impacts. In: van Alfen N., (ed.) *Encyclopaedia of agriculture and food systems, vol. 1*. San Diego: Elsevier, 244-252.
- Pataki D.E., Oren R., 2003. Species differences in stomatal control of water loss at the canopy scale in a mature bottomland deciduous forest. *Advances in water resources*, 26 : 1267-1278.
- Picasso C., 1984. Synthèse des résultats acquis en matière de recherche sur le Karité au Burkina Faso de 1950 à 1958. Ivraz/Irho.
- Seghieri J., 2019. Shea tree (*Vitellaria paradoxa* Gaertn. F.): from local constraints to multi-scale improvement of economic, agronomic and environmental performance in an endemic Sudanian multipurpose agroforestry species. *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00351-1>.
- Tateishi M., Kumagai T., Utsumi Y., Umabayashi T., Shiiba Y., Inoue K., Kaji K., Cho K., Otsuki K., 2008. Spatial variations in xylem sap flux density in evergreen oak trees with radial-porous wood: comparisons with anatomical observations. *Trees*, 22: 23-30.
- Tia L., 2008. Modeling of vegetation dynamics and its contribution to the water balance in semi-arid lands of West Africa. *Ecology and development series*, 58.
- Venkatraman K. and Ashwath N., 2016. Transpiration in 15 tree species grown on a phytocapped landfill site. *Hydrology current research*, 7: 2.
- West G.B., Brown J.H., Enquist B.J., 1999. A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature*, 400: 664-667.
- Wiedemann A., Jiménez S.M., Rebman C., Cuntz M., Herbst M., 2013. An empirical study of the wound effect on sap flux density measured with thermal dissipation probes. *Tree physiology*, 36 : 1471-1484.

►► Les auteurs

Agbossou Euloge

INE et LHME/FSA, Université Abomey
Calavi de Cotonou, PO Box 01 BP 526
Cotonou, Bénin
agbossou.euloge@yahoo.fr

Awessou Kohomlan G. Beranger

Direction générale des Eaux, Forêts et Chasse
(DGEFC), BP 393 Cotonou, Bénin
kohomlan@yahoo.fr

Peugeot Christophe

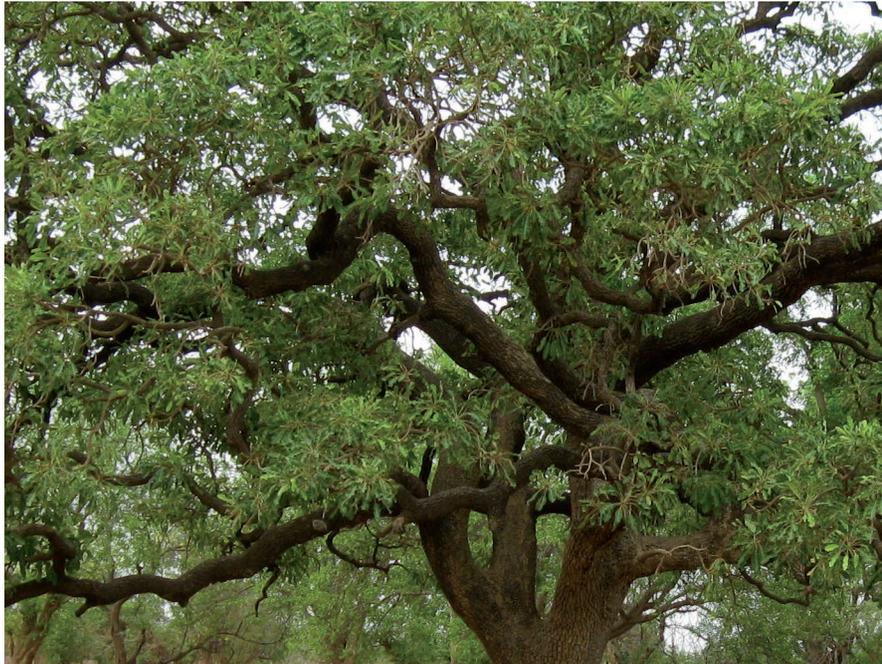
Université de Montpellier, CNRS, IRD,
UMR-HydroSciences, Montpellier,
Montpellier, France
christophe.peugeot@ird.fr

Seghieri Josiane

Université de Montpellier, CNRS, IRD,
UMR-HydroSciences, Montpellier, France
josiane.seghieri@ird.fr

AGROFORESTERIE ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES EN ZONE TROPICALE

Josiane Seghieri et Jean-Michel Harmand, coordinateurs



Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale

Recherche de compromis
entre services d'approvisionnement
et autres services écosystémiques

Josiane Seghieri et Jean-Michel Harmand,
coordinateurs

Éditions Quæ

Collection Update Sciences & Technologies

Systèmes agraires et changement
climatique au Sud

H. Cochet, O. Ducourtieux,
N. Garambois, coord.

2018

Trente années d'observation
des microalgues et des toxines
d'algues sur le littoral

C. Belin, D. Soudan

2018

Stratégies des filières fromagères
sous AOP en Europe

Modes de régulation

et performance économique

P. Jeanneaux

2018

Services écosystémiques

et protection des sols

Analyses juridiques

et éclairages agronomiques

C. Hermon, coord.

2018

Paroles de chercheurs

Environnement et interdisciplinarité

E. Brun, J.-F. Ponge, J.-C. Lefeuvre

2017, 124 p.

Démanteler les barrages

pour restaurer les cours d'eau

Controverses et représentations

R. Barraud, M.-A. Germaine, coord.

2017, 260 p.

Construire des politiques

alimentaires urbaines

Concepts et démarches

C. Brand, N. Bricas, D. Conaré,

B. Daviron, J. Debru, L. Michel,

C.-T. Soulard, coord.

2017, 160 p.

Éditions Quæ

RD 10, F-78026 Versailles Cedex

© Quæ, 2019

ISBN (Pdf) : 978-2-7592-3059-4

ISBN (ePub) : 978-2-7592-3060-0

Cet ouvrage est sous licence CC-by-NC-ND. Vous êtes autorisé à partager — copier, distribuer et communiquer le matériel par tous moyens et sous tous formats selon les conditions suivantes :

– attribution — Vous devez créditer l'œuvre et indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que l'éditeur et l'auteur vous soutiennent ou soutiennent la façon dont vous avez utilisé l'œuvre.

– pas d'utilisation commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette œuvre, tout ou partie du matériel la composant.

– pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez un remix, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'œuvre originale, vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'œuvre modifiée.

– pas de restrictions complémentaires — Vous n'êtes pas autorisé à appliquer des conditions légales ou des mesures techniques qui restreindraient légalement autrui à utiliser l'œuvre dans les conditions décrites par la licence.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr/>