

---

## Contribution des arbustes au fonctionnement hydrique et carboné des parcs agroforestiers à *Guiera senegalensis* J.F. Gmel : observations et modélisation

ISSOUFOU H. B.-A., DEMARTY J., CAPPELAERE B., ALLIES A.,  
VELLUET C., MAÏNASSARA I., OÏ M., CHAZARIN J.-P.,  
MOUSSA MOUMOUNI R. ET SEGHERI J.

**Résumé.** Notre objectif est d'évaluer la contribution des arbustes de *Guiera senegalensis* aux flux d'eau et de carbone dans un parc agroforestier à petit mil (*Pennisetum glaucum* L.R. Br.) et dans une jachère. Le site expérimental est situé au sud-ouest du Niger, sur un bassin-versant sahélien de 2 km<sup>2</sup>. À l'échelle de l'arbuste de *Guiera senegalensis*, le taux de transpiration foliaire a été déduit de la conductance stomatique et du déficit de pression de vapeur. La dynamique de la biomasse aérienne et souterraine des arbustes a été suivie en saison des pluies, en saison sèche froide et en saison sèche chaude. À l'échelle de la parcelle, les bilans d'eau et d'assimilation du carbone ont été estimés par une modélisation de type « transferts surface-végétation-atmosphère ». Le modèle est paramétré à partir de mesures automatiques de terrain selon la méthode des corrélations turbulentes. Le taux de transpiration foliaire et la biomasse aérienne de *Guiera* ont augmenté dans le parc, de la saison des pluies à la saison sèche chaude, alors qu'ils ont diminué dans la jachère. Les résultats du modèle montrent une activité de la jachère centrée sur la saison des pluies, mais décalée vers le début de la saison sèche pour le parc. À l'échelle de la parcelle, le modèle est capable de bien simuler l'évapotranspiration et l'assimilation de carbone au regard de la période de la croissance active des arbustes dans les deux types de couvert, tout en assurant un haut degré de cohérence avec le contenu en eau du sol.

**Abstract.** The main objective of this work is to evaluate the contribution of the shrubs to the water and CO<sub>2</sub> flux in the soil-vegetation-atmosphere continuum and to the carbon sequestration in a pearl millet-*Guiera senegalensis* agroforestry parkland and a fallow. The experimental site is located in a 2 km<sup>2</sup> Sahelian watershed in South-West Niger.

At shrub scale, the leaf transpiration rate was deduced from stomatal conductance and vapor pressure deficit. The dynamics of field above- and below-ground biomass dynamic survey was conducted in rainy, cool and hot dry seasons. At plot scale, water budget and carbon assimilation were estimated by Svat (surface-vegetation-atmosphere transfer) modeling approach, parameterized from field measurements (Eddy correlation). At shrub scale, leaf transpiration rate and aboveground biomass increased in the parkland from rainy to hot dry season while it decreased in fallow. The model results show a fallow activity peaking during the rainy season but shifting towards the beginning of the dry season for the parkland. At plot scale, the model is able to finely match the measured evapotranspiration and carbon assimilation with regard to the period of active growth of shrubs specific, keeping consistent with the soil water in both cover types.

## ► Introduction

L'association culture-arbuste est typique des systèmes d'agriculture sahéliens. Elle est étudiée depuis plus de vingt ans (Louppe, 1991; Wezel *et al.*, 2000; voir également chapitre 12). *Guiera senegalensis* J.F. Gmel est une Combretaceae soudano-sahélienne dominante sur les sols sableux, lessivés ou épuisés. En zone sahélienne agropastorale en particulier, malgré la forte pression de coupe exercée par les agriculteurs, l'espèce se maintient dans les parcs agroforestiers en association avec le petit mil (*Pennisetum glaucum*) et, par conséquent, aussi dans les jachères (Saâdou, 1990; Arbonnier, 2001). Dans les champs de mil, les arbustes sont rabattus au moment du semis ou de la levée des plantules de mil pour éliminer toute compétition avec la céréale. De plus, le bois est utilisé comme combustible (Louppe, 1991).

En pleine saison des pluies, lorsque la compétition pour l'eau et les nutriments n'est plus préjudiciable à la croissance du mil, la partie aérienne des arbustes se régénère alors de façon rapide, de sorte que les plants de mil et les rejets de *G. senegalensis* coexistent jusqu'à la récolte du mil, en fin de saison des pluies. Les rejets conservent leur feuillage durant presque toute la saison sèche, contrairement aux arbustes non rabattus de la jachère. Nos premiers résultats (Issoufou *et al.*, 2013) ont montré que le maintien du feuillage était dû à un stress hydrique relativement faible des rejets (potentiel hydrique foliaire faiblement négatif) du fait d'une conductance hydraulique élevée et d'une embolie initiale faible dans les vaisseaux encore jeunes des rejets. L'absence de stress a été interprétée comme une probable conséquence d'un ratio racines/partie aérienne plus élevé chez les rejets que chez les arbustes non rabattus en jachère. De plus, la densité des arbustes est plus faible dans les parcs agroforestiers que dans les jachères, ce qui induit une plus grande disponibilité en eau pour les arbustes dans les parcs (Ramier *et al.*, 2009). Enfin, la gestion des champs pour une production maximale de mil bénéficierait aussi aux rejets; certaines études récentes ont montré qu'une augmentation des rendements céréaliers autour des arbustes était liée à un effet d'«îlot de fertilité» de l'arbuste (Wezel, 2000; Wezel *et al.*, 2000, voir chapitre 12).

Dans ce chapitre, le fonctionnement éco-hydrologique du parc agroforestier et de la jachère est étudié sous l'angle des processus d'échange d'eau et de carbone dans le continuum sol-végétation-atmosphère, à partir des observations *in situ* à l'échelle de l'arbuste et de la parcelle et des développements récents d'une modélisation de type

« transferts surface-végétation-atmosphère » (TSVA). Les résultats sont présentés en distinguant, d'une part, les processus de régulation hydrique et, d'autre part, les processus d'assimilation et de séquestration du carbone.

## ► Site d'étude et méthodologie

Un parc agroforestier à *G. senegalensis* et une jachère ont été instrumentés en 2005 pour des mesures intensives et un suivi sur le long terme sur le versant de Wankama (2,6°E; 13,6°N), à environ 60 km à l'est de Niamey au Niger (Cappelaere *et al.*, 2009). Ce versant est l'un des sites pilotes du Service national d'Observation (SNO) et d'analyse multidisciplinaire de la mousson africaine - couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique (Amma-Catch, 2018). Un des objectifs de cet observatoire est d'étudier les interactions et les couplages entre les cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone à partir des mesures de processus microclimatiques et de la végétation. Des mesures et des observations sont réalisées conjointement sur une parcelle située dans un parc agroforestier associant le petit mil et *G. senegalensis* et sur une parcelle située dans une jachère (savane arbustive). Elles ont permis de mesurer et de caractériser :

- la pluviométrie et la micro-météorologie locales;
- les échanges thermo-hydriques dans le continuum sol-végétation-atmosphère à l'échelle de la parcelle (humidimétrie et thermique du sol, flux d'énergie, d'eau et de CO<sub>2</sub> à l'interface surface-atmosphère);
- le développement saisonnier du couvert (hauteur et indice foliaire) et sa productivité (biomasses aérienne et souterraine, opération financée par le projet Safse, 2018).

À l'échelle de l'arbuste, le taux de transpiration foliaire (Tr, mmol/m<sup>2</sup>/s) a été déduit à partir de la conductance stomatique et du déficit de pression de la vapeur par Issoufou *et al.* (2013) dans le parc agroforestier et dans la jachère. Pour compléter cette étude, dix-huit arbustes espacés d'au moins 3 m les uns des autres ont été échantillonnés dans le parc agroforestier et dans la jachère. Leur hauteur totale, le plus grand diamètre de houppier et le diamètre perpendiculaire (généralement le plus petit) ont été mesurés. Les biomasses aérienne et souterraine de chaque arbuste ont été estimées par la méthode destructive et l'excavation exhaustive du système souterrain jusqu'à 1 m de profondeur. En effet, l'arbuste posséderait plus de 90 % de sa biomasse racinaire dans cet horizon (Kizito *et al.*, 2007). Ce protocole a été appliqué en saison des pluies (juin-octobre), en saison sèche froide (novembre-janvier) et en saison sèche chaude (février-mai). Les biomasses ont été ensuite estimées (au laboratoire de l'IRD de Niamey) par pesée après étuvage, à 70 °C pour les feuilles et les racines fines et à 105 °C pour le bois et les racines architecturales. Le carbone total contenu dans les arbustes est estimé à 50 % de la biomasse sèche selon les références sur les espèces ligneuses de savanes de IPCC (2007) et Lufafa *et al.* (2008).

À l'échelle de la parcelle, une modélisation des transferts sol-végétation-atmosphère est développée. Elle est adaptée au milieu sahélien (modèle Sispas - Simple soil plant atmosphere transfer; Braud *et al.*, 1995; Braud, 1998) et repose sur les observations faites dans le cadre du Service national d'observation (Amma-Catch). Une étape préliminaire a consisté à éprouver la capacité de ce modèle à décrire le fonctionnement

thermo-hydrigue du parc agroforestier (Velluet *et al.*, 2014). Des développements récents ont ensuite permis la prise en compte du fonctionnement carboné du parc agroforestier et de la jachère par l'intégration d'un module d'assimilation photosynthétique et de régulation stomatique (modèle A-gs; Jacobs, 1994) au modèle initial des transferts sol-végétation-atmosphère. La capacité du nouveau modèle à estimer les flux de CO<sub>2</sub> à l'interface sol-végétation-atmosphère, tout en conservant sa robustesse sur les flux et les stocks d'eau et d'énergie, a été évaluée (Allies, 2015).

## ► Régulation hydrique

### Régulation hydrique à l'échelle de l'arbre

La fig. 13.1 présente la pluviométrie journalière, le déficit de pression de vapeur (DPV) moyen journalier et le taux de transpiration foliaire journalière maximale (Tr max) mesurés en 2010. Le taux de transpiration foliaire (Tr max) est corrélé positivement au déficit de pression de vapeur dans le parc agroforestier uniquement ( $F = 6,461$ ;  $P = 0,03856$ ). La transpiration foliaire diminue concomitamment avec le déficit de pression de vapeur de juillet à septembre, les mois les plus pluvieux de l'année.

Les mesures de terrain et les sorties du modèle Sispat (fig. 13.2) confirment qu'en cette saison, la disponibilité en eau du sol pour la végétation est plus élevée sous le parc à *G. senegalensis* que sous la jachère (Ramier *et al.*, 2009; Velluet *et al.*, 2014; Issoufou *et al.*, 2015). À l'échelle de l'arbre, ces résultats indiquent que, tant que

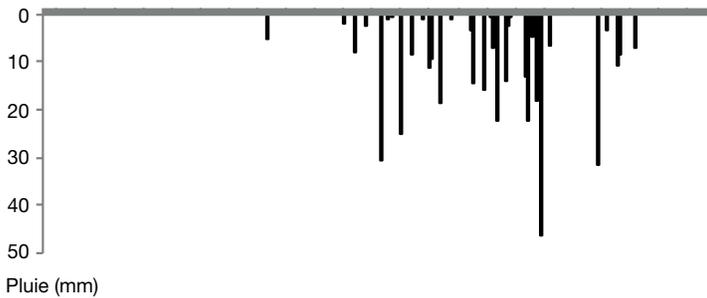


Figure 13.1a. Variation de la pluviométrie en 2010.

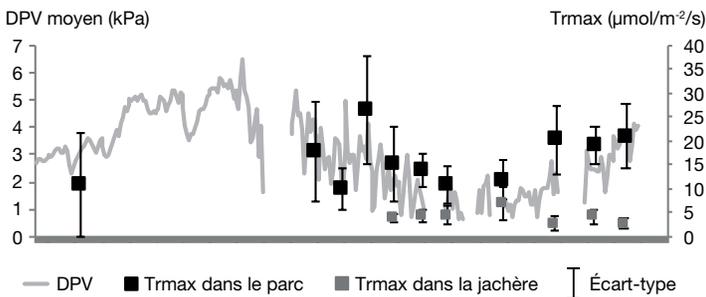


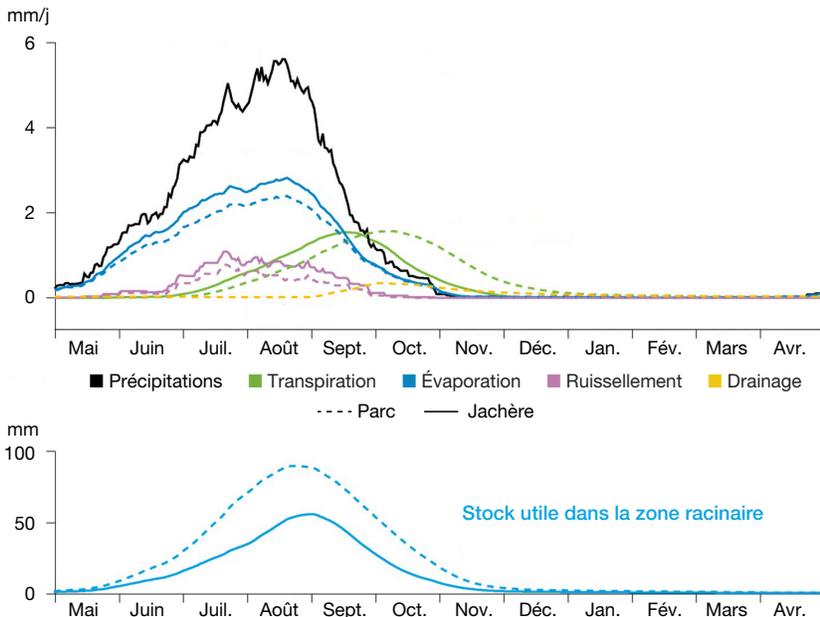
Figure 13.1b. Variations du déficit de pression de vapeur (DPV) et du taux maximum de transpiration journalier (Tr max) mesurée chez *G. senegalensis*

le contenu en eau du sol est suffisant pour compenser la transpiration du couvert ligneux, le taux maximum de transpiration du couvert ligneux est limité par la demande évaporative de l'atmosphère, comme l'est l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle. Boulain *et al.* (2009) ont en effet montré que, dans les parcelles localisées dans le parc agroforestier, l'évapotranspiration était limitée par les conditions atmosphériques jusqu'à un seuil de teneur relative en eau du sol correspondant à 70%. En dessous de ce seuil, elle diminue avec la baisse de la teneur en eau du sol.

## Régulation hydrique à l'échelle de la parcelle

Les comportements hydrologiques et énergétiques du parc agroforestier et de la jachère à l'échelle de la parcelle ont été modélisés de 2005 à 2012 à partir des observations de terrain : précipitations, rayonnements, micro-météorologie, humidimétrie et développement saisonnier de la végétation. La figure 13.2 illustre les évolutions saisonnières annuelles moyennes des composantes du cycle hydrologique simulées par le modèle Sispat dans le parc agroforestier et en jachère.

Des différences de fonctionnement apparaissent clairement entre les deux types de couverts, alors qu'ils sont soumis à des conditions pluviométriques et météorologiques similaires. Le ruissellement et l'évaporation directe du sol sont plus faibles dans le parc agroforestier que dans la jachère, tandis que le stockage de l'eau dans la zone racinaire y est plus élevé. Le pic de la transpiration foliaire ( $T_r$  max) est



**Figure 13.2.** Bilan hydrique simulé par le modèle Sispat dans le parc agroforestier et dans la jachère.

Variations saisonnières moyennes simulées des composantes du cycle de l'eau, pour les jachères (lignes continues) et les parcelles en parc agroforestier associant petit mil et *Guiera senegalensis* (lignes pointillées), exprimées en moyenne glissante de 10 jours simulées pour sept années d'observation, de 2005 à 2012 (Velluet *et al.*, 2014, modifié).

également plus tardif (octobre) dans le parc agroforestier par rapport à la jachère (septembre); ce décalage s'explique principalement par la reprise de la régénération intensive des rejets dans le parc agroforestier après la récolte du mil (Issoufou *et al.*, 2013, 2015). La régénération des arbustes est favorisée par les plus grandes quantités d'eau disponibles, une compétition pour les ressources (en particulier l'eau) limitée par un couvert moins dense qu'en jachère et la diminution de l'encroûtement du sol par le travail du sol effectué auparavant pour le mil. On observe une plus grande capacité du parc agroforestier à stocker ou à remobiliser de l'eau dans la zone racinaire et au-delà (drainage intense sous le parc mais inexistant sous la jachère; fig. 13.2) qui pourrait résulter d'une contribution des parcs agroforestiers à la recharge diffuse de la nappe (Massuel *et al.*, 2011; Ibrahim *et al.*, 2014).

## ► Stock et assimilation de carbone

### Évaluation de la biomasse et du stock de carbone à l'échelle de l'arbre

La gestion des arbustes dans les parcs arbustifs d'Afrique de l'Ouest est liée au calendrier cultural et aux stades de développement de la culture (Lahmar *et al.*, 2012; Issoufou *et al.*, 2015). Dans le parc à *G. senegalensis* et dans la jachère, nous avons quantifié la biomasse sèche totale produite par arbuste au cours de la saison des pluies, la saison sèche froide et la saison sèche chaude (tab. 13.1). La biomasse totale a augmenté de 13 % dans le parc agroforestier et diminué de 15 % dans la jachère entre la saison des pluies et la saison sèche chaude (février-mai) avant défrichage.

Dans le parc agroforestier, l'augmentation de la biomasse totale est due à un accroissement de la biomasse aérienne de 55 % et une réduction de la biomasse racinaire de 16 %, principalement les racines fines; le ratio biomasse racinaire/biomasse aérienne a diminué de moitié dans le même temps (de 3 à 1,5). Dans le parc agroforestier, une diminution significative de la quantité de racines fines de 30 % en saison sèche froide et de 45 % en saison sèche chaude est observée également.

Du fait de la défeuillaison et du ralentissement de la croissance des arbustes de février à juin dans la jachère (Issoufou *et al.*, 2013), la diminution de la biomasse est plus liée à une réduction de la biomasse racinaire (19 % pour les racines grossières et 40 % pour les racines fines) qu'à celle de la biomasse aérienne (10 %).

Ainsi, dans la jachère, le ratio biomasse racinaire/biomasse aérienne est passé de 1 en saison des pluies à 0,85 en saison sèche froide et 0,94 en saison sèche chaude. Cette dynamique intersaisonnière de la biomasse ligneuse correspond à une augmentation de stock de carbone de 13 % dans le parc agroforestier et une diminution de 15 % dans la jachère entre la saison des pluies et la saison sèche chaude (tab. 13.2).

Dans le parc agroforestier, la biomasse arbustive (3,5-3,9 tDM/h) et le stock de carbone (1,7-1,9 tC/ha) se situent dans la gamme de valeurs proches de celles (0,44-4,58 tDM/ha et 0,9-1,4 tC/ha respectivement) observée par Lufafa *et al.* (2008, 2009) dans un parc similaire au Sénégal avec une pluviométrie de 540 mm/an. Le système racinaire arbustif a stocké 75 % du carbone total en saison des pluies et 56 % en saison sèche chaude dans le parc agroforestier, contre 50 % pour la jachère sur les mêmes périodes.

**Tableau 13.1.** Variation de la biomasse aérienne et souterraine moyennes en fonction des saisons chez *G. senegalensis* dans le parc agroforestier et dans la jachère du bassin-versant à Wankama, Niger.

Parcelle	Période	Biomasse racinaire (tDM/ha)		Biomasse aérienne (tDM/ha)	Biomasse totale (tDM/ha)
		Racines grossières > 2 mm	Racines nourricières < 2 mm		
Parc agroforestier	Saison des pluies (n=6) <sup>(1)</sup>	2,66 (0,27) <sup>(2)</sup>	0,11 (0,026)	0,75 (0,07)	3,52 (0,28)
	Saison sèche froide (n=6)	2,37 (0,45)	0,07 (0,02)	1,40 (0,17)	3,83 (0,45)
	Saison sèche chaude (n=6)	2,23 (0,61)	0,05 (0,01)	1,70 (0,14)	3,98 (0,63)
Jachère	Saison des pluies (n=6)	4,19 (0,75)	0,13 (0,02)	4,12 (0,62)	8,43 (0,69)
	Saison sèche froide (n=6)	3,57 (1,14)	0,01 (0,02)	4,29 (0,57)	7,96 (1,38)
	Saison sèche chaude (n=6)	3,39 (0,33)	0,07 (0,02)	3,68 (0,93)	7,14 (1,04)

<sup>(1)</sup> n : nombre d'arbustes échantillonnés. <sup>(2)</sup> Écart-type de la moyenne.

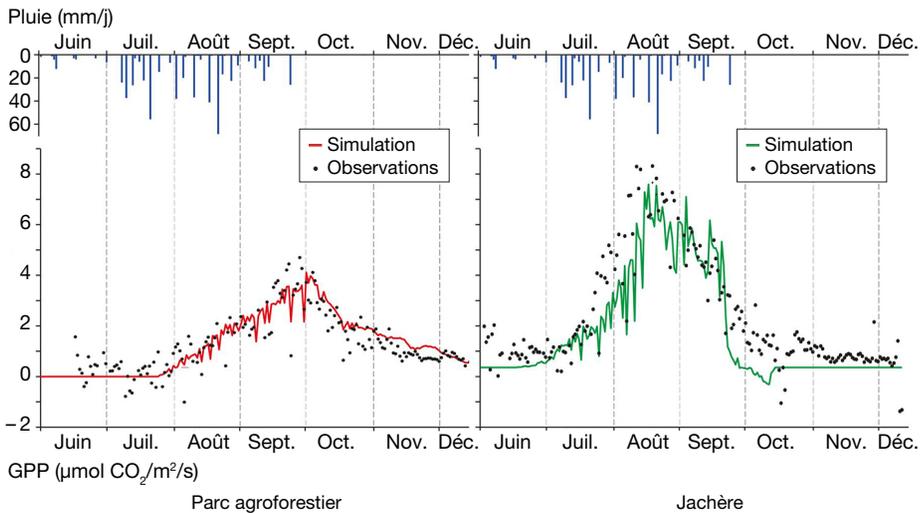
**Tableau 13.2.** Taux moyen du stock de carbone dans la biomasse aérienne et souterraine en fonction des saisons chez l'arbuste *G. senegalensis* dans le parc agroforestier et la jachère à Wankama, Niger.

Parcelle	Période	Carbone de la biomasse racinaire (tC/ha)	Carbone de la biomasse aérienne (tC/ha)	Carbone total de la biomasse (tC/ha)
Parc	Saison des pluies (n=6) <sup>(1)</sup>	1,33 (0,13) <sup>(2)</sup>	0,38 (0,036)	1,76 (0,14)
	Saison sèche froide (n=6)	1,18 (0,22)	0,70 (0,08)	1,92 (0,23)
	Saison sèche chaude (n=6)	1,12 (0,30)	0,85 (0,07)	1,99 (0,32)
Jachère	Saison des pluies (n=6)	2,09 (0,37)	2,06 (0,31)	4,22 (0,34)
	Saison sèche froide (n=6)	1,79 (0,57)	2,15 (0,28)	3,98 (0,69)
	Saison sèche chaude (n=6)	1,69 (0,17)	1,84 (0,46)	3,57 (0,52)

<sup>(1)</sup> n : nombre d'arbustes échantillonnés. <sup>(2)</sup> Écart-type de la moyenne.

## Assimilation de carbone à l'échelle de la parcelle

Les processus de photosynthèse et de transpiration sont couplés à l'échelle de la feuille par le biais de la régulation stomatique. Le couplage réalisé entre le modèle Sispat et le module de photosynthèse de Jacobs (1994) permet désormais de tenir compte de ces processus de manière mécaniste dans la modélisation des transferts sol-végétation-atmosphère. Il permet aussi de comprendre le fonctionnement de l'assimilation du carbone atmosphérique par les feuilles, qui peut être ensuite comparée aux observations (Allies, 2015). Les résultats ont montré la bonne tenue du modèle couplé à restituer le cycle annuel de photosynthèse observé dans le parc agroforestier et la jachère (fig. 13.3).



**Figure 13.3.** Pluviométrie et variations saisonnières de l'assimilation de carbone (*Gross Primary Productivity* – micromoles  $\text{CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ ) observées et simulées pour le parc agroforestier associant mil-*Guiera senegalensis* et la jachère en 2007.

Précisément, les différences obtenues entre le modèle et les observations sont plus faibles pour le parc agroforestier que pour la jachère, ceci pouvant s'expliquer par une composition spécifique simple (mil et rejets d'arbustes du même âge) et un couvert (plants de mil et repousses de *Guiera*) plus homogène dans le parc agroforestier que dans la jachère. En effet, la jachère se compose d'un mélange d'arbustes (photosynthèse en  $\text{C}_3$ ) d'âges différents avec des plantes annuelles (photosynthèse en  $\text{C}_3$  et  $\text{C}_4$ ) qui ne sont pas différenciées dans le modèle actuel.

Les évolutions saisonnières du couvert du parc agroforestier et de la jachère sont contrastées : pour la jachère, un départ précoce, un phasage net avec la saison des pluies et un cycle d'assimilation de carbone raccourci. De telles différences sont directement liées aux résultats obtenus concernant la régulation hydrique. Elles sont dues aussi aux effets du défrichage du parc agroforestier en début de saison, au semis du mil après les premières pluies, à la reprise de la régénération intensive des rejets d'arbustes au cœur de la saison des pluies et son maintien tout au long de la saison sèche après la récolte du mil.

## » Conclusion

Dans les parcs agroforestiers, la contribution de la transpiration des rejets de *G. senegalensis* à l'évapotranspiration réelle est significative après la récolte de mil, c'est-à-dire à partir de la fin de la saison des pluies. La régénération intensive des arbustes est liée à leurs caractéristiques physiologiques propres, elle est favorisée par des conditions de plus grande disponibilité en eau que dans les jachères. Nos résultats montrent la meilleure capacité des rejets à séquestrer du carbone en saison sèche que celle des arbustes matures en jachère, qui sont partiellement défeuillés et très peu actifs. Ces résultats mettent également en évidence une réduction de la biomasse racinaire des arbustes dans le parc agroforestier et dans la jachère en saison sèche. Toutefois, la version actuelle du modèle des transferts sol-végétation-atmosphère fonctionne sur un forçage des paramètres liés à la végétation (i.e. profil racinaire et indice foliaire). L'étape suivante serait d'inclure un module d'allocation du carbone aux différents organes de la plante (*G. senegalensis* en jachère, mil et *G. senegalensis* en parc agroforestier). Ce type de dispositif de mesures envisagé à l'échelle de la plante et de la parcelle, ainsi que la modélisation associée, permettront d'aborder des études d'impacts des différents scénarios de réaffectation d'usage des terres et de changement climatique sur le devenir des ressources hydrologiques et végétales.

## » Remerciements

Ce travail a été réalisé en partie grâce au financement du Système national d'observation « Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine : couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique » et du projet Cirad-IRD Safse. L'acquisition et le traitement des données ont été assurés par l'équipe du laboratoire de l'IRD Niamey et celle de l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi.

## » Bibliographie

- Allies A., 2015. Étude des interactions hydrologie-végétation en milieu sahélien : apport d'un nouveau modèle de surface et impacts des pratiques agropastorales sur les ressources. Mémoire de master mention Eau (Spécialité Hydrologie risque environnement). Montpellier : Université de Montpellier, 127 p.
- Amma-Catch, 2018. Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine : couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique. [www.amma-catch.org/](http://www.amma-catch.org/) (Consulté le 31 mars 2017)
- Arbonnier M., 2011. *Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest*. 3<sup>e</sup> ed. Versailles, France : Éditions Quæ.
- Boulain N., Cappelaere B., Ramier D., Issoufou H.B.A., Halilou O., Seghieri J., Guillemain F., Oï M., Gignoux J., Timouk F., 2009. Towards an understanding of coupled physical and biological processes in cultivated Sahel. 2. Vegetation and carbon dynamics. *Journal of hydrology*, 375: 190-203.
- Braud I., Dantas-Antonino A.C., Vauclin M., Thony J.L., Ruelle P., 1995. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (Sispat) development and field verification. *Journal of hydrology*, 166: 213-250.
- Braud I., 1998. Spatial variability of surface properties and estimation of surface fluxes of a savannah. *Agricultural and forest meteorology*, 89: 15-44.

- Cappelaere B., Descroix L., Lebel T., Boulain N., Ramier D., Laurent J.P., Favreau G., Boubkraoui S., Boucher M., Bouzou Moussa I., Chaffard V., Hiernaux P., Issoufou H.B.A., Le Breton E., Mamadou I., Nazoumou Y., Oi M., Otlle C., Quantin G., 2009. The Amma-Catch experiment in the cultivated sahelian area of southwest Niger-investigating water cycle response to a fluctuating climate and changing environment. *Journal of hydrology*, 375: 34-51.
- Ibrahim M., Favreau G., Scanlon B.R., Seidel J.L., Le Coz M., Demarty J., Cappelaere B., 2014. Long-term increase in diffuse groundwater recharge following expansion of rainfed cultivation in the Sahel, West Africa. *Hydrogeology journal*, 22: 1293-1305.
- Issoufou H.B.A., Delzon S., Laurent J.P., Saâdou M., Mahamane A., Cappelaere B., Demarty J., Oi M., Rambal S., Seghieri S., 2013. Change in water loss regulation after canopy clear-cut of a dominant shrub in Sahelian agrosystems, *Guiera senegalensis* J.F. Gmel. *Trees*, 27: 1011-1022.
- 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.
- Jacobs C.M.J., 1994. Direct impact of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on regional transpiration. Ph.D. Thesis. Wageningen, Pays-Bas: Agricultural University, 179 p.
- Kizito F., Dragila M., Sène M., 2006. Seasonal soil water variation and root patterns between two semi-arid shrubs co-existing with pearl millet in Senegal. *West African journal of arid environment*, 67: 436-455.
- Lahmar R., Bationo B.A., Dan Lamso N., Guéro Y., Tiltonell P., 2012. Tailoring conservation agriculture technologies to West Africa semi-arid zones: building on traditional local practices or soil restoration. *Field crop research*, 132: 158-167.
- Louppe D., 1991. *Guiera senegalensis* : espèce agroforestière ? Micro-jachère dérobée de saison sèche et approvisionnement énergétique d'un village du centre-nord du bassin arachidier sénégalais. *Bois et forêts des tropiques*, 228 : 41-47.
- Lufafa A., Diédhiou I., Samba S.A.N., Séné M., Kouma M., Kizito F., Dick R.P., Dossa E., Noller J.S., 2008. Carbon stocks and patterns in native shrub communities of Senegal's peanut basin. *Geoderma*, 146: 75-8.
- Lufafa A., Diédhiou I., Ndiaye N.A.S., Séné M., Kizito F., Dick R.P., Noller J.S., 2009. Allometric relationships and peak-season community biomass stocks of native shrubs in Senegal's peanut basin. *Journal of arid environments*, 73: 260-266.
- Massuel S., Cappelaere B., Favreau G., Leduc C., Lebel T., Vischel T., 2011. Integrated surface water-groundwater modelling in the context of increasing water reserves of a regional Sahelian aquifer. *Hydrological sciences journal*, 56: 1242-1264. Doi:10.1080/02626667.2011.609171.
- Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E., (eds), 2007. *Climate change 2007. Impacts, adaptation and vulnerability: contribution of working group II to the fourth assessment. Report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, Royaume-Uni: Cambridge University Press.
- Ramier D., Boulain N., Cappelaere B., Timouk F., Rabanit M., Lloyd C.R., Boubkraoui S., Metayer F., Descroix L., Wawrzyniak V., 2009. Towards an understanding of coupled physical and biological processes in the cultivated Sahel. 1. Energy and water. *Journal of hydrology*, 375: 204-216.
- Saâdou M., 1990. La végétation des milieux drainés nigériens à l'est du fleuve Niger. Thèse de doctorat, Université de Niamey, Niger.
- Safse, 2018. Recherche de compromis entre productions et services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers tropicaux. <https://safse.cirad.fr/> (consulté le 23 novembre 2018).
- Velluet C., Demarty J., Cappelaere B., Braud I., Issoufou H.B.A., Boulain N., Ramier D., Mainassara G., Charvet G., Boucher M., Chazarin JP., Oi M., Yahou H., Maidaji B., Arpin-Pont F., Benarrosh N., Mahamane A., Nazoumou Y., Favreau G., Seghieri J., 2014. Building a field- and model-based climatology of local water and energy cycles in the cultivated Sahel - Annual budgets and seasonality. *Hydrology and earth system sciences*, 11: 4753-4808.
- Wezel A., 2000. Scattered shrubs in pearl millet fields in semiarid Niger: effect on millet production. *Agroforestry systems*, 48: 219-228.
- Wezel A., Rajot J.L., Herbric C., 2000. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *Journal of arid environment*, 44: 383-398.

## ► Les auteurs

### **Allies Aubin**

IRD, Université de Montpellier,  
UMR-HydroSciences, Montpellier, France  
aubin.allies@umontpellier.fr

### **Cappelaere Bernard**

Université de Montpellier, CNRS, IRD,  
UMR-HydroSciences, Montpellier, France  
bernard.cappelaere@umontpellier.fr,  
bernard.cappelaere@ird.fr

### **Chazarin Jean-Philippe**

Université de Montpellier, CNRS, IRD,  
UMR-HydroSciences, Montpellier, France  
jean-philippe.chazarin@umontpellier.fr

### **Demarty Jérôme**

Université de Montpellier, CNRS, IRD,  
UMR-HydroSciences, Montpellier, France  
jerome.demarty@ird.fr

### **Issoufou Hassane Bil-Assanou**

Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi,  
Faculté d'agronomie et des sciences de  
l'environnement, département des Sciences  
et techniques de productions végétales,  
Maradi, Niger  
bil-assanou@hotmail.com

### **Mainassara Ibrahim**

IRD, Niamey, Niger  
ibrahim.mainassara@ird.fr

### **Moussa Moumouni Rachida**

Faculté d'agronomie et des sciences de  
l'environnement, département des Sciences  
et Techniques de Productions Végétales,  
Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi,  
Maradi, Niger  
Rachidamoussa15@gmail.com

### **Oï Monique**

Université de Montpellier, CNRS, IRD,  
UMR-HydroSciences, Montpellier, France  
monique.oi@umontpellier.fr

### **Seghieri Josiane**

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

### **Velluet Cécile**

Université de Montpellier, CNRS, IRD,  
UMR-HydroSciences, Montpellier, France  
cecile.velluet@gmail.com,  
cecile.velluet@inra.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/>