Chapitre 2

Suivi des services écosystémiques dans un observatoire de caféiers agroforestiers. Recommandations pour la filière du café

Roupsard O., Allinne C., Van den Meersche K., Vaast P., Rapidel B., Avelino J., Jourdan C., Le Maire G., Bonnefond J.-M., Harmand J.-M., Dauzat J., Albrecht A., Chevallier T., Barthès B., Clément-Vidal A., Gomez-Delgado F., Charbonnier F., Benegas L., Welsh K., Kinoshita R., Vézy R., Pérez-Molina J.-P., Kim J., Taugourdeau S., Defrenet E., Nespoulous J., Rançon F., Guidat F., Cambou A., Soma M., Mages C., Schnabel F., Prieto I., Picart D., Duthoit M., Rocheteau A., Do F., de Melo Virginio Filho E., Moussa R., Le Bissonnais Y., Valentin C., Sanchez-Murillo R., Roumet C., Stokes A., Vierling L., Eitel J., Dreyer E., Saint-André L., Malmer A., Loustau D., Isaac M., Martin A., Priemé A., Eberling B., Madsen M., Robelo A., Robelo D., Borgonovo C., Lehner P., Ramirez G., Jara M., Acuña Vargas R., Barquero A., Fonseca C. et Gay F.

Résumé. Huit ans de travaux de recherche sur les services écosystémiques dans une grande ferme caféière du Costa Rica (observatoire collaboratif Coffee-Flux, en système agroforestier à base de caféiers sous de grands arbres d'*Erythrina poeppigiana*, surface projetée de couronne de l'ordre de 16 %) ont suggéré plusieurs applications pour les agriculteurs et les décideurs. Il est apparu que de nombreux services écosystémiques dépendaient des propriétés du sol (ici des Andisols), en particulier de l'érosion, de l'infiltration, de la capacité de stockage de l'eau et des éléments nutritifs. Nous confirmons qu'il est essentiel de lier les services hydrologiques et de conservation au type de sol en présence. Une densité adéquate d'arbres d'ombrage (plutôt faible ici) permet de réduire la sévérité des maladies foliaires avec, en perspective, une réduction de l'usage de pesticides-fongicides. Un simple inventaire de la surface basale au collet des caféiers permet d'estimer la biomasse souterraine et la moyenne d'âge d'une plantation de caféiers, ce qui permet

d'évaluer sa valeur marchande ou de planifier son remplacement. Le protocole de calcul actuel pour la neutralité carbone des systèmes agroforestiers ne prend en compte que les arbres d'ombrage, pas la culture intercalaire. Dans la réalité, si on inclut les caféiers, on se rapproche très probablement de la neutralité. Des évaluations plus complètes, incluant les arbres, les caféiers, la litière, le sol et les racines dans le bilan en carbone du système agroforestier sont proposées. Les arbres d'ombrage offrent de nombreux servies écosystémiques s'ils sont gérés de manière adéquate dans le contexte local. Par rapport aux parcelles en plein soleil, nous montrons qu'ils réduisent l'érosion laminaire d'un facteur 2, augmentent la fixation de l'azote (N_2) atmosphérique et le pourcentage d'azote recyclé dans le système, réduisant ainsi les besoins en engrais. Ils réduisent aussi la sévérité des maladies foliaires, augmentent la séquestration de carbone, améliorent le microclimat et atténuent substantiellement les effets des changements climatiques. Dans notre étude de cas, aucun effet négatif sur le rendement n'a été enregistré.

Abstract. Eight years of studying coffee ecophysiology and monitoring ecosystem services (ES) in a large coffee farm in Costa Rica revealed several practical recommendations for farmers and policy makers. The cropping system studied within our collaborative observatory (Coffee-Flux) corresponds to a coffee-based agroforestry system (AFS) under the shade of large trees of Erythrina poeppigiana (16 % of canopy cover). A lot of ES and disservices depend on local soil properties (here Andisols), especially erosion/infiltration, water/carbon and nutrient storage capacity. Therefore, for ES assessment, the type of soil is crucial. An adequate density of shade trees (rather low here) reduced the severity of leaf diseases with the prospect of reducing pesticide-fungicide use. A simple inventory of the basal area at collar of the coffee plants allowed estimating the belowground biomass and the average age of the plantation, to judge of its market value and to decide when to replace it. Coffee farms are probably much closer to C neutrality than predicted by the current C-Neutral protocol, which only considers shade trees. More comprehensive assessments, including trees, coffee, litter, soil, and roots in the C balance of the AFS are proposed. Shade trees offer many ES if they are adequately managed in the local context. As compared to full sun conditions, shade trees may (i) reduce laminar erosion by a factor of 2, (ii) increase N_2 fixation and the % of N recycled into the system, thus reducing fertilizer requirements, (iii) reduce the severity of leaf diseases, (iv) increase C sequestration, (v) improve the microclimate, and (vi) substantially reduce the effects of climate change. In our case study, no negative effect on coffee yield was found.

Introduction

Le caféier est une culture pérenne tropicale cultivée dans environ 80 pays. La consommation mondiale de café est supérieure à 9 millions de tonnes, dont environ 65 % proviennent de *Coffea arabica* L. On estime que l'ensemble de la chaîne de valeur du café (de la culture au marketing) implique environ 100 millions de personnes dans le monde. Aujourd'hui, les certifications Nama-Café[1] et C-Neutre[2] promeuvent les modes de culture permettant l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques. Beaucoup de recherches fructueuses sont publiées chaque année sur le café, mais il n'existait pas d'observatoire collaboratif sur un même site avec des approches multidisciplinaires et verticales (même unité de lieu et de

1. https://www.namacafe.org/
2. Certification C-neutre Costa Rica : https://presidencia.go.cr/comunicados/2016/09/meta-de-carbono-neutralidad-para-el-2021-se-mantiene-y-fortalece/.

temps). Un tel observatoire offre la possibilité de relier plusieurs disciplines de recherche et d'avoir une vue d'ensemble et à long terme de l'écophysiologie du caféier dans des conditions réelles.

En 2009, le Cirad, le Catie et la ferme d'Aquiares[3] ont créé leur observatoire collaboratif à long terme « Coffee-Flux »[4] pour l'étude biophysique du système agroforestier caféier (fig. 2.1). La ferme d'Aquiares est située dans le bassin du Reventazón, dans la région Centre-Caraïbes du Costa Rica, aux coordonnées 9°56'17'' (Nord) et 83°43'41'' (Ouest), sur la pente du volcan Turrialba. Certifiée Carbon-Neutral et Rainforest Alliance™[5], c'est l'une des plus grandes fermes du Costa Rica (6,6 km^2). La parcelle principale où sont installés les principaux instruments de mesure (tour-à-flux, venturi) est à 1 000 m d'altitude, dans un bassin hydrographique de 1 km^2.

L'objectif de Coffee-Flux est d'évaluer les flux de carbone, d'eau, de nutriments, de N_2O et d'érosion et de quantifier les services écosystémiques, de la plante jusqu'au bassin versant ou à la ferme. L'observation, l'expérimentation, la modélisation et la télédétection sont combinées. Les données sont collectées (fig. 2.2) et les modèles sont calibrés localement, de la plante à la parcelle (ha) avant de changer d'échelle (bassin, ferme). L'observatoire est suivi depuis 2009 afin d'appréhender les fluctuations saisonnières et interannuelles de la productivité du caféier et les services écosystémiques associés. L'observatoire Coffee-Flux a été soutenu en permanence par plusieurs institutions et projets, dont le projet Safse (Compromis entre production et autres services écosytémiques fournis par les systèmes agroforestiers, Cirad/IRD).

Figure 2.1. L'observatoire collaboratif CoffeeFlux dans la ferme d'Aquiares : caféiers sous grandes érythrines.

3. Cafetalera Aquiares : http://auction.stoneworks.com/includes/crq2004/aquiares_brochure.html
4. Coffee-Flux Observatory: http://www.umr-ecosols.fr/index.php/fr/recherche/projets/53-coffee-flux.
5. Rainforest-Alliance™ : https://www.rainforest-alliance.org/lang/fr.

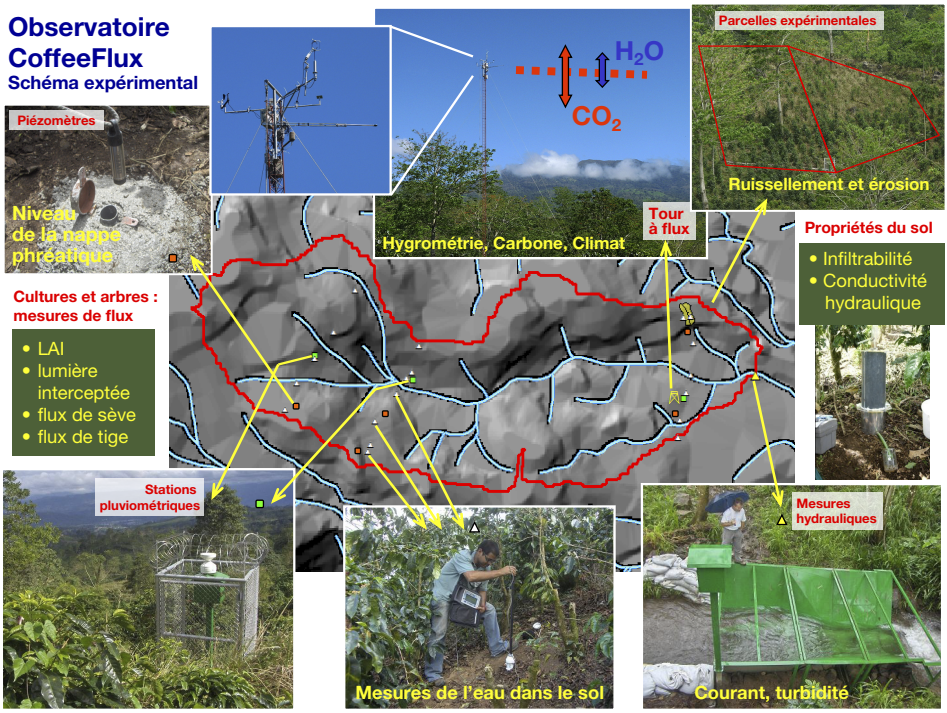

Figure 2.2. Dispositif expérimental de l'observatoire collaboratif CoffeeFlux dans la ferme d'Aquiares : mesures et modélisations des flux de C, H_2O, nutriments, de l'érosion, des services écosystémiques dans un système agroforestier à base de caféier.

La philosophie est de concentrer plusieurs recherches sur un site spécifique et pendant plusieurs années, de partager une base de données expérimentale commune, de développer la modélisation et de publier des résultats dans des revues scientifiques de haut rang. Cette recherche collaborative a été possible grâce à des interactions positives entre plusieurs institutions (Isaac *et al.,* 2017 ; Kim *et al.,* 2017 ; Martin *et al.,* 2017 ; Prieto *et al.*, 2015 ; Sánchez-Murillo *et al.,* 2016). La recherche appliquée a été également fortement encouragée (Roupsard *et al.,* 2017) : en agronomie, sur la sélection de variétés, pour les certifications C-Neutre et NAMA (De Melo Virginio Filho *et al.,* 2015 ; Roupsard, 2015). Coffee-Flux bénéficie de l'infrastructure du Catie, d'un accès facile au terrain et d'une bonne sécurité. La base de données (disponible sous R) accélère le partage.

Notre objectif ici est de présenter les principales réalisations de Coffee-Flux après huit ans de suivi, soulignant l'intérêt pratique pour les producteurs de café et les décideurs. Nous nous concentrerons sur : les stocks de carbone des sols ; l'hydrologie ; l'érosion, la fertilisation, l'ombrage et le rendement ; la fertilisation et les flux de N_2O ; la sévérité du complexe des maladies foliaires et l'ombrage ; l'indice foliaire et le rendement du caféier ; les racines; les effets de l'ombrage sur la productivité primaire du caféier et sur son efficience d'utilisation de la lumière ; le bilan de carbone de l'écosystème ; les arbres d'ombrage et leur adaptation aux changements climatiques.

⏩ Quelques applications pratiques de Coffee-Flux

Stock de carbone très élevé et grande variabilité horizontale dans les andisols

La plupart des sols sous caféiers dans la région étudiée sont des andisols, ou leurs versions plus évoluées (ultisols). Les andisols proviennent de cendres volcaniques régulièrement déposées, ici par le volcan Turrialba. Ces cendres évoluent en allophanes. Puis avec le temps en argiles, les andisols deviennent alors des ultisols.

Les andisols sont des sols jeunes et riches en allophanes (jusqu'à 20 %). Plus il y a d'allophanes, plus fortes sont leurs propriétés andiques. Les allophanes ont une structure nanométrique avec une très grande surface. Ils peuvent piéger beaucoup d'eau, de carbone et d'éléments minéraux tels que le phosphore. Les contaminants sont probablement accumulés dans ces sols aussi. Le pourcentage d'allophanes est très corrélé avec les stocks de carbone des sols. Les stocks de carbone sont élevés, de l'ordre de 560 ± 180 t C/ha ou 56 ± 18 kg C/m^2 entre 0 et 2 m (Chevallier *et al.,* résultats préliminaires), soit un ordre de grandeur dix fois plus élevé que la biomasse aérienne et souterraine évaluée à 37 t C/ha (Charbonnier *et al.*, 2017 ; Defrenet *et al.,* 2016).

Avec le temps, les allophanes sont lessivés et transformés en une séquence d'argiles : la teneur en carbone peut être extrêmement variable à l'échelle d'une ferme (Kinoshita *et al.,* 2016), comme révélé par spectométrie infrarouge. Le pourcentage d'allophanes (ou le rapport allophanes/argiles) étant le principal déterminant de la variabilité spatiale des stocks de carbone des sols, il faut l'appréhender avant d'évaluer les stocks de carbone des sols dans les fermes ou entre fermes.

Applications pratiques

En fonction du rapport allophanes/argiles, les besoins en fertilisation pourraient être très différents, même au sein de petites zones apparemment homogènes. La mise à disposition de cartes détaillées des andisols agricoles permettrait aux agriculteurs d'économiser des engrais et de minimiser leur impact sur le sol et l'eau. La spectrométrie infrarouge est un outil prometteur pour le criblage des sols à haut débit.

Grande infiltrabilité des andisols, le bilan hydrologique piloté par l'aquifère

Les parcelles avec andisols d'Aquiares infiltrent environ 92 % de la pluie (Gómez-Delgado *et al.,* 2011). Le ruissellement de surface au sein des parcelles est donc très faible, sa contribution au débit de rivière n'est que de 4 %. Les andisols sont une « éponge » avec une teneur élevée en eau permise par les allophanes, une macroporosité élevée, un fort drainage profond et une infiltration très élevée (> 1 000 mm/heure) (Benegas *et al.,* 2014 ; Hasselquist *et al.,* 2018). Le débit de la rivière dépend principalement des aquifères (56 %) (Gómez-Delgado *et al.,* 2011), notamment *via* des sources (Welsh *et al.,* 2018).

Applications pratiques

La gestion sans labour du caféier semble bénéficier à l'aquifère dans les andisols. Cependant, en raison d'une infiltration importante, les contaminants transitent probablement dans l'aquifère. Il est recommandé de surveiller le niveau et la qualité des aquifères dans de tels sols, notamment dans les régions plus sèches où des effets de concentration sont probables.

Effet prépondérant du type de sol par rapport à celui de la présence d'arbres d'ombrage sur l'érosion

Les andisols présentent une faible érosion laminaire, en cohérence avec les faibles ruissellements de surface mesurés. La production de sédiments par le bassin versant est très faible (environ 1 t/ha/an). Très peu de sédiments (environ 5 %) proviennent des parcelles caféières elles-mêmes. Les deux tiers des sédiments proviennent en fait du lit de la rivière. Le reste (environ 1/3) provient des routes et des sentiers situés entre les parcelles caféières. Le ruissellement est en effet élevé sur les routes provoquant une érosion des bordures de parcelles. Par conséquent, l'érosion ne doit pas être considérée à l'échelle de la parcelle, mais à l'échelle de la ferme avec ses infrastructures ou à l'échelle du bassin versant (Gómez-Delgado, 2010). Néanmoins, les arbres d'ombrage atténuent le ruissellement et l'érosion par un facteur de près de deux par rapport aux parcelles de plein soleil, même si cela représente peu à l'échelle du bassin versant sur ce genre de sols.

Applications pratiques

La faible érosion laminaire en parcelles sur andisols et le rôle important des routes et des bordures de parcelles dans la production de sédiments conduisent à recommander la construction de canalisations en béton le long des chemins afin de détourner le ruissellement vers les parcelles où il pourra être infiltré. Il faut aussi protéger en priorité les berges de rivières. Quel que soit le contexte pédologique de la ferme, nous recommandons d'effectuer une étude hydrologique rapide avant de choisir les meilleures mesures contre l'érosion (Gómez-Delgado, 2010).

Fertilisation, ombrage et rendement

Selon les résultats préliminaires de Van den Meersche *et al.* (en préparation), la quantité d'azote recyclée par l'écosystème est plus élevée sous ombrage qu'en plein soleil. Les arbres d'ombrage étudiés ici étaient des érythrines. Le taux de recyclage est plus élevé si les érythrines sont émondées régulièrement (environ 150 à 300 kg N recyclé/ha/an) que si elles poussent librement (< 70 kg N recyclé/ha/an). Cinq mois après l'élagage de l'érythrine, plus de 40 % de l'azote des résidus d'élagage persistent dans la litière et le sol et 23 % se retrouvent dans les caféiers. Aussi, dans le système basé sur la taille, l'élagage apparaît comme la voie essentielle de transfert de l'azote de l'érythrine au caféier.

Sous ombrage et sur andisols, nous avons observé que le sol peut être laissé sans fertilisation pendant environ cinq ans sans chute du rendement en café. Ceci a été observé lors de la manipulation des apports d'engrais (0, 110 ou 230 kg N/ha/an). L'azote total du sol n'a pas été affecté dans le traitement faiblement fertilisé, alors que l'azote minéral a baissé d'un facteur trois dans le traitement faiblement fertilisé par rapport au traitement fortement fertilisé. La production alternée (forte-faible) sur deux ans, ou biennialité, du rendement est plus élevée en plein soleil (Schnabel *et al.,* 2018).

Applications pratiques

La grande capacité de stockage d'azote des andisols permet de conserver de bons rendements en café pendant plusieurs années, malgré des apports réduits d'engrais (ici la moitié du niveau actuel de 200 kg/ha), voire des apports nuls. Cette information est utile lorsque les conditions économiques sont défavorables dans le contexte de fluctuations des prix du café. À plus long terme, il est prometteur de prolonger les études d'optimisation des apports d'engrais pour des questions de rentabilité économique et d'impact sur l'environnement. Cependant, les exigences en matière d'engrais dépendent beaucoup du type de sol. La grande variabilité des sols à l'échelle de la ferme pourrait inciter à une agriculture de précision, consistant à ajuster la fertilisation aux conditions micro-locales, afin de réduire les dépenses totales et la contamination des eaux en nitrates.

Fertilisation et flux de N_2O du sol

Van den Meersche *et al.* (en préparation) ont mesuré les flux de N_2O du sol dans les parcelles de plein soleil pendant une année en utilisant des chambres dynamiques (mesures continues). Les parcelles testées ont reçu des apports d'azote contrastés (0 vs 230 kg N/ha.an), ceci dès quatre ans avant la mesure. Dans les parcelles non fertilisées, les flux de N_2O sont restés faibles, autour de 1 g N-N_2O /ha/jour. Dans les parcelles fertilisées, les flux ont considérablement augmenté : de 1 g N-N_2O/ha/jour pendant la saison sèche, jusqu'à 2-3 g N-N_2O/ha/jour pendant la saison humide. Ils ont culminé à 15 g N-N_2O/ha/jour juste après l'application d'engrais avec un pic étroitement lié aux événements pluvieux et pouvant durer jusqu'à deux mois. Cependant, moins de 1 % de l'azote apporté par l'engrais a été libéré sous forme de N_2O. Après la pluie, les taux d'infiltration élevés éliminent les nitrates, et entraînent une diminution des conditions redox. Ainsi, l'azote (N) est plutôt susceptible d'être soustrait au système sol que d'être libéré sous forme de N_2O dans l'atmosphère.

Applications pratiques

Nous avons mesuré des émissions de N_2O sensiblement inférieures à celles calculées à partir des valeurs standard du GIEC* (protocole C-Neutral standard). En outre, une optimisation de l'apport d'engrais, avec de moindres quantités et des fréquences d'apport plus élevées, aiderait encore à diminuer les émissions de N_2O et réduirait considérablement la lixiviation potentielle des nitrates.

* Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat : https://www.ipcc.ch/

Un ombrage adéquat atténue le complexe des maladies foliaires sans affecter le rendement

Allinne *et al.* ont mis en place une étude factorielle avec deux niveaux d'exposition (ombrage vs plein soleil) et deux niveaux de protection phytosanitaire (conventionnel vs protection maximale), dans laquelle on a mesuré la sévérité (en % de la surface foliaire affectée) de cinq bioagresseurs foliaires : *Mycena citricolor* (*Ojo de gallo* ou *american leaf spot*), *Hemileia vastatrix* (*Roya* ou rouille), *Cercospora caffeicola* (*Cercospora*, cercosporiose), *Leucoptera coffealia* (mineuse) et *Phoma costaricensis* (*Phoma*). L'expérimentation a duré trois ans (2012-2014), incluant l'épidémie régionale historique de rouille de 2012.

La protection maximale a réduit considérablement l'impact des maladies. Quelle que soit l'année considérée, l'exposition ombrage ou plein soleil n'a pas eu d'effet sur les impacts de la rouille ou de la mineuse. En revanche, l'ombrage a réduit l'impact de la cercosporiose. Mais il a aggravé celui de *Mycena citricolor* (*Ojo de gallo*). Globalement, lorsque l'on prend en compte les effets cumulés de l'ensemble du cortège des maladies et ravageurs foliaires, l'ombrage a réduit significativement la sévérité du complexe de bioagresseurs de 10 à 20 %. L'ombrage a réduit à la fois la charge en fruits des caféiers, mais aussi les pertes de rendement attribuables aux maladies ; ce qui s'est finalement compensé. Un rendement conservé avec des besoins réduits en pesticides-fongicides confère un réel intérêt des arbres d'ombrage dans la culture de caféiers.

Applications pratiques

Si l'on considère l'ensemble du cortège de bioagresseurs foliaires du caféier, l'ombrage réduit de 10 à 20 % la sévérité sans affecter le rendement. Un ombrage adéquat peut réduire les besoins en pesticides-fongicides et améliorer la rentabilité de la culture de caféiers.

L'indice foliaire (LAI) du caféier, un indicateur des services écosystémiques

Une reconstruction des séries chronologiques de LAI (2001-2011) a été réalisée grâce à deux calibrations successives :
– la calibration du Normalized difference vegetation index (NDVI) provenant d'une image satellite à haute résolution *via* le LAI vrai mesuré au sol sur chacune des couches (arbres d'ombrage et caféiers) ;
– la calibration du NDVI obtenu par Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) (Le Maire *et al.,* 2014 ; Taugourdeau *et al.*, 2014) avec l'image à haute résolution calibrée.

Le LAI du caféier varie de façon saisonnière entre 2,4 et 4,4 m^2 feuille/m^2 sol avec un maximum vers la fin de la saison humide, une forte baisse au cours de la saison sèche, un minimum après l'élagage annuel du caféier, un rétablissement durant la saison des pluies suivante et un second minimum pendant la période de remplissage du grain. Avec MODIS, nous avons également détecté des variations interannuelles

significatives de LAI provenant de l'élagage annuel ou de la rénovation des parcelles. Le LAI des arbres d'ombrage, les érythrines, était en moyenne annuelle de 0,67 m^2 feuille/m^2 de sol.

Nous avons corrélé les séries chronologiques du LAI du caféier avec les registres agricoles afin d'examiner les répercussions de la gestion des parcelles sur le LAI et sur certains services écosystémiques, en particulier le rendement et le ruissellement de surface. La fertilisation en azote est ajustée annuellement par l'agriculteur, elle reste le meilleur prédicteur de rendement. Mais en combinant la fertilisation en azote avec le LAI de six mois de l'année, la prédiction s'améliore. Le LAI est donc un co-prédicteur important du rendement. Ce modèle peut s'utiliser pour la cartographie des rendements régionaux et pour la reconstruction des séries temporelles de rendements passés.

L'indice foliaire a aussi été utilisé dans la modélisation des services hydrologiques. Lorsqu'il est doublé de 3,8 à 7,6, l'évapotranspiration est augmentée de 60 %, le ruissellement superficiel diminue de 1 %, le débit de la rivière se réduit de 17 % et la quantité d'eau qui traverse l'aquifère est réduite de 20 % (Taugourdeau *et al.,* 2014).

Applications pratiques

Le LAI est un indicateur de rendement au niveau de la ferme, mais aussi au niveau régional. La télédétection du LAI fonctionne également pour évaluer des pertes de rendement associées aux pertes de feuillage. C'est une technique très prometteuse pour suivre la rouille et *l'american leaf spot*. Elle pourrait être préconisée dans les programmes d'alerte qui se sont beaucoup développés récemment, suite à l'attaque historique de rouille en 2012. Le LAI peut être aussi utilisé pour simuler des services hydrologiques.

Les racines du caféier représentent 50 % de la biomasse

Les racines de caféier poussent jusqu'à 4 m de profondeur. La biomasse souterraine du caféier peut être estimée allométriquement.

Nous avons estimé la biomasse et la productivité primaire nette (NPP) de la parcelle (caféiers et arbres d'ombrage érythrine), en tenant compte des racines profondes et de la position des plants de caféier par rapport aux arbres. La croissance du cep et des racines, ainsi que la biomasse, le renouvellement et la décomposition des racines ont été évaluées. Les anneaux de croissance ont été étudiés à la base du cep sur des gammes de tailles de plants de caféiers. La biomasse racinaire et la densité de racines fines ont été mesurées dans des tranchées jusqu'à une profondeur de 4 m. Le renouvellement des racines fines a été mesuré par carottage séquentiel du sol sur 0-30 cm pour tenir compte de l'hétérogénéité du sous-sol agroforestier. Ceci a été réalisé pendant un an et à différents endroits (en plein soleil ou sous les arbres, sur le rang et dans l'interrang) (Defrenet *et al.,* 2016).

Des relations allométriques ont été proposées pour calculer la biomasse et la productivité primaire nette des parties pérennes à l'échelle de la parcelle. Des relations linéaires entre la surface basale au collet et la biomasse des compartiments pérennes

(ceps, racines grossières, etc.) permettent d'estimer aisément le stock de carbone dans la biomasse des plantations de caféier.

Le rayon au collet du cep augmente jusqu'à 2,5 mm/an (stabilisé entre 12 et 44 ans). 92 % de la biomasse racinaire du caféier est située sur une profondeur de 1,5 m, et seulement 8 % jusqu'à 4 m. La biomasse des racines pérennes est de 16 t/ha et leur productivité primaire nette de 1,3 t/ha/an. La biomasse des racines fines (sur une profondeur de 0 à 30 cm) est deux fois plus élevée dans le rang que dans l'interrang. La biomasse des racines fines est de 2,29 t/ha, soit 12 % de la biomasse racinaire totale,. Leur productivité primaire nette est de 2,96 t/ha/an, soit 69 % de la productivité primaire nette totale de la racine. Le taux de renouvellement des racines fines est de 1,3 fois/an.

Le système racinaire de caféier représente 49 % de la biomasse végétale totale. Un tel ratio est peut-être une conséquence de l'élagage. Il n'y a aucun effet significatif des arbres d'ombrage sur la biomasse des racines fines du caféier, ce qui suggère que le système racinaire du caféier est très compétitif dans la couche superficielle du sol (Defrenet *et al.,* 2016).

Les anneaux de croissance sont annuels pour des caféiers en zone humide sans interruption de croissance. L'étude de ces anneaux de croissance, combinée à l'inventaire de la répartition surface au collet, permet de calculer l'âge moyen d'une parcelle entière (Defrenet *et al.,* 2016).

Applications pratiques

Les équations allométriques basées sur le diamètre au collet du caféier permettent d'estimer aisément sa biomasse souterraine et donc son stock de carbone dans la biomasse souterraine. La caractérisation de l'âge et des cohortes moyennes de la parcelle, telle que proposée ici, pourrait être très utile pour estimer la vigueur et la productivité d'une parcelle, ou pour normaliser les comparaisons habituellement effectuées entre les plantations, voire pour évaluer la valeur d'une plantation donnée sur le marché. Cet âge moyen pourrait également être utilisé pour déterminer le moment optimal auquel appliquer la rénovation.

Les arbres d'ombrage augmentent l'efficience d'utilisation de la lumière du caféier, ce qui compense les pertes de productivité primaire nette

Les arbres d'ombrage des systèmes agroforestiers affectent la répartition de la lumière (Charbonnier *et al.,* 2013). Nos observations de terrain et la modélisation 3D montrent que la lumière sous les arbres est très variable et modifie la physiologie de la culture intercalaire (Charbonnier *et al.,* 2017). La réduction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (APAR) est, dans une certaine mesure, compensée par une augmentation de l'efficience de l'utilisation de la lumière (LUE). La différence de productivité primaire nette du caféier entre l'ombre et le plein soleil est ainsi réduite. En raison de la grande hétérogénéité spatiale des systèmes agroforestiers et du manque d'outils appropriés, les effets combinés de ces variables avaient rarement

été analysés. Pourtant, leur étude permet de comprendre les processus physiologiques sous-jacents à la dynamique des rendements (Charbonnier *et al.,* 2017).

Dans cette étude, la productivité primaire nette (NPP) à l'échelle du caféier et de la parcelle a été mesurée pendant deux ans. Le rayonnement absorbé a été cartographié avec un modèle 3D (MAESPA) : 35 % de la lumière disponible au-dessus des caféiers arrive au sol. Cela constitue une perte de ressource considérable (Charbonnier *et al.,* 2013). On ne peut pas augmenter la densité des caféiers à cause des maladies, mais il est possible de couvrir le sol avec des cultures utiles. L'efficience d'utilisation de la lumière et le taux net d'assimilation ont été calculés individuellement pour chaque caféier. Bien que la lumière disponible ait été réduite de 60 % en dessous des couronnes d'arbres d'ombrage, l'efficience d'utilisation de la lumière du caféier a augmenté de 50 %. La productivité primaire nette et le rendement des caféiers sous ombrage sont donc restés à un niveau élevé. À l'issue du projet, une base de données a été constituée. Elle regroupe biomasse et productivité primaire nette du caféier en condition de plein soleil ou d'ombrage. La variabilité de la productivité primaire nette intraparcelle du caféier est principalement expliquée par l'âge des plantes et par une compétition intraspécifique entre caféiers plutôt que par la présence d'arbres d'ombrage (Charbonnier *et al.,* 2017).

Applications pratiques

Les modèles de transmission de lumière indiquent que 35 % de la lumière disponible au-dessus des caféiers finit au sol : cette ressource importante est sous-utilisée et force au désherbage. Il serait judicieux de développer des plantes de couverture, fixatrices de N_2 si possible. Mais la crainte de la compétition avec le caféier ou des serpents dans les interrangs est un frein à cela dans beaucoup de régions.

La compensation de la perte de lumière sous les arbres d'ombrage par une efficience accrue de l'utilisation de la lumière du caféier renforce la confiance dans l'utilisation d'arbres d'ombrage. Les modèles utilisés, comme Maespa, permettent de calculer la concurrence pour la lumière entre caféiers, les plus anciens ombrageant les plus jeunes, et de calculer ou d'optimiser les impacts de l'élagage et de la densité des plants de caféier sur leur productivité.

Grâce aux modèles, la lumière absorbée par les caféiers est devenue une variable continue dans l'espace et le temps. Ceci permet de mettre fin à la dichotomie ombre/lumière longtemps utilisée pour décrire les systèmes agroforestiers. La lumière peut ainsi être calculée pour chaque plante, quelle que soit sa distance à l'arbre ou son environnement radiatif. La lumière absorbée peut être cartographiée et utilisée comme co-variable pour tout autre type d'étude agronomique dans des parcelles agroforestières hétérogènes.

Pourquoi le caféier est-il épuisé après seulement quelques années de production ? Le rôle de l'amidon

La taille des caféiers est une action cruciale car elle affecte les rendements et le besoin de main-d'œuvre. Seulement, les caféiers ne sont productifs que pendant

trois ans sur les six ans de durée de vie du rejet avec des coûts de main-d'œuvre élevés. Pourquoi une si courte période productive ?

Nous avons étudié les effets de l'exposition (ombrage ou plein soleil) et de la maturité (pieds immatures de deux ans ou pieds matures de 5 ans) sur les concentrations de carbohydrates non structurels (NSC), leurs stocks dans les feuilles, tiges et ceps, ainsi que la dynamique de l'amidon au cours de la vie des caféiers. Nous avons utilisé les méthodes analytiques classiques et la spectroscopie de réflectance visible et proche infrarouge (VNIRS) (Cambou *et al.,* soumis).

Les variables trophiques liées à l'activité de photosynthèse (azote, glucose, fructose, saccharose) diminuent depuis les feuilles vers les tiges, puis les souches. En revanche, les variables liées à la structure et aux réserves de la plante (C, C:N et amidon) ont montré la tendance inverse, avec des valeurs plus élevées dans les organes à longue durée de vie comme les ceps. Les concentrations de N, glucose et fructose sont plus élevées dans les organes de deux ans que dans ceux de cinq ans. Ceci confirme un ratio source/puits plus important en l'absence du puits de fruits. L'effet de l'exposition, plein soleil ou ombrage, est faible sur les variables mesurées. La spectroscopie de réflectance visible et proche infrarouge (VNIRS) est un outil prometteur, rapide et rentable pour suivre la dynamique des carbohydrates non structurels, en particulier l'amidon.

Nos résultats montrent que le rejet (temporaire) s'épuise alors même que son cep (pérenne) accumule de l'amidon. L'épuisement du rejet provient d'une forte concurrence entre trois grands puits : les fruits, la croissance des rejets et le stockage de l'amidon dans les parties pérennes. En effet, le caféier est l'un des rares arbustes qui verse (se plie) naturellement avant de rejeter. Il illustre la fonction de « survie » des carbohydrates non structurels chez les plantes (Cambou *et al.,* soumis).

Applications pratiques

Des variétés de caféier sélectionnées pour accumuler moins d'amidon dans leurs parties pérennes exprimeront probablement une durée de vie de leurs rejets prolongée et donc un plus grand nombre d'années productives du rejet. La VNIRS, en tant que technique de mesure à haut débit, permettra le dépistage de ces variétés.

Bilan de carbone de l'écosystème

Les fermes caféières sont-elles déjà proches de la neutralité C ? Tout dépend de la méthode de calcul.

La ferme d'Aquiares (Costa Rica) a réalisé l'évaluation de ses émissions de gaz à effet de serre pour l'usine, les déchets et les engrais. Les émissions annuelles de 1 100 t CO_2eq ont été compensées financièrement, ce qui était nécessaire pour l'obtention de la certification « C-Neutre » de la ferme en 2016. Cette ferme peut servir de pilote au niveau national et potentiellement au niveau régional pour l'avenir. Si les facteurs d'émission du GIEC sont utilisés, un tiers des émissions de la ferme serait dû aux émissions de N_2O par l'utilisation d'engrais et presque autant aux émissions de CH_4 par la fermentation de la pulpe.

Selon les règles de certification C-Neutre (scénario 1), seuls les arbres d'ombrage en croissance, les forêts en croissance et la biomasse du bois de caféier utilisée comme énergie recyclée pour le séchage du grain de café peuvent être considérés comme des puits de carbone de la ferme. Le bois recyclé pour les séchoirs est une énergie renouvelable qui compense une bonne part des émissions de gaz à effet de serre de l'usine, des engrais (N_2O) et des déchets (CH_4). Néanmoins, les caféiers et le sol restent exclus des calculs de ce scénario 1. En effet, le GIEC considère que les cultures en général sont neutres dans les échanges de gaz à effet de serre entre l'écosystème et l'atmosphère.

Que se passerait-t-il si le caféier et le sol étaient ré-évalués en tant que puits ?

Le scénario 2 teste cette hypothèse et considère les caféiers non pas comme une culture annuelle standard, mais comme un petit arbre. Le scénario 2 inclut donc le stockage de carbone des caféiers en croissance, ainsi que dans la litière et le sol. Le bilan de carbone a été mesuré par Eddy-covariance des parcelles agroforestières (arbres + caféier + litière + sol) de la ferme d'Aquiares pendant huit années, pour un stockage moyen de 3,6 t C/ha/an. De ce chiffre, il faut en réalité déduire les exportations de fruits et de bois pour le séchage du grain (2,75 t C/ha/an), en tenant compte du fait que la combustion du bois a déjà été décomptée comme énergie renouvelable dans le calcul des émissions annuelles de 1 100 t CO2eq. Au final, la séquestration de carbone par les parcelles agroforestières, en prenant les caféiers en compte, compense les émissions de l'usine + engrais + déchets. Cela indique que la ferme est virtuellement, si on accepte d'inclure les caféiers dans le décompte, déjà C-Neutre, voire même un puits de carbone.

Applications pratiques

La principale différence entre le scénario 1 (le protocole C-Neutre standard) et le scénario 2 est l'intégration des caféiers, de la litière et des sols. Le scénario 2 est avantageux pour l'agriculteur qui payerait moins de compensation carbone pour ses émissions car sa ferme se rapprocherait de la neutralité. Ceci reste également compatible avec l'objectif d'améliorer l'efficience en carbone de la ferme pour chaque année de certification successive. Cela aurait également l'avantage au niveau du pays, d'accélérer le processus de certification C-neutre des plantations de caféier et de créer éventuellement des crédits carbone à vendre en interne ou à l'étranger.

Les arbres d'ombrage, un levier pour l'adaptation au changement climatique

Nous avons étudié le potentiel de l'agroforesterie pour atténuer la température de canopée des caféiers par expérimentation sur le terrain et par modélisation. L'ouverture de la canopée des arbres d'ombrage a été évaluée par photographie hémisphérique au-dessus de chaque caféier.

Nous avons mesuré des différences de variables microclimatiques entre les parcelles à l'ombre et celles en plein soleil (Soma *et al.,* 2017). L'ombrage réduit la température maximale de l'air de 1,7 °C. Les feuilles de caféier en plein soleil ont montré des températures jusqu'à 5 °C supérieures à l'air environnant. La réduction de la

température moyenne journalière de la couche de caféiers serait de -0,5 °C pour le niveau bas dans la couronne à -1,1 °C, pour le niveau élevé dans la couronne.

La modélisation permet d'ajuster l'ombrage pour des climats actuels et futurs, quelles que soient les conditions d'altitude, de pente, d'exposition ou de microclimat. Un modèle statistique simple et d'intérêt assez générique a été proposé pour prédire la température de la canopée du caféier en utilisant la température de l'air en plein soleil, l'ouverture de la canopée des arbres d'ombrage et la fraction de lumière diffuse. Un modèle agroforestier plus sophistiqué (MAESPA-DynACof) permet de calculer le bilan radiatif, les flux d'énergie, de CO_2 et d'H_2O dans des parcelles caféières hétérogènes complexes (Vezy *et al.,* 2018 ; Vezy *et al.*, soumis).

Applications pratiques

Nous confirmons que l'agroforesterie constitue une solution intéressante pour atténuer les effets de l'élévation de la température sur le rendement, en complément d'autres stratégies comme la sélection variétale. Les outils de modélisation aideront à ajuster l'ombrage aux conditions locales (altitude, pente, exposition et rayonnement).

Conclusions

Les résultats interdisciplinaires obtenus à long terme dans une ferme caféière en milieu réel, montrent que la gestion du caféier pourrait être plus efficace à l'avenir pour l'énergie, l'eau, les nutriments et les services écosystémiques en général. Un meilleur couplage entre la recherche, la vulgarisation, les projets de développement et l'expérience des agriculteurs est recommandé pour orienter l'investissement, dans l'intérêt de la rentabilité économique et de l'environnement. En raison de ses nombreuses vertus confirmées ici, l'ombrage est à recommander : il est préférable de l'ajuster pour chaque ferme ou même pour chaque condition de terrain et la modélisation peut appuyer cet effort.

De plus, il est recommandé que les projets de développement ne se basent pas uniquement sur des règles générales, mais consacrent une partie de leur budget aux vérifications locales de ces règles. Un minimum d'investissement dans l'expertise scientifique au départ des projets devrait améliorer leur impact *a posteriori*.

Remerciements

Notre étude fait partie de l'observatoire Coffee-Flux, développé par le Cirad, le Catie et Cafetalera Aquiares. Le site Coffee-Flux appartient au réseau d'observatoires SOERE F-ORE-T qui est soutenu annuellement par Ecofor, Allenvi et l'infrastructure nationale de recherche ANAEE-F (http://www.anaee-france.fr/fr/). Coffee-Flux a été soutenu par le projet européen Cafnet (EuropAid/121 998/C/G), le projet Ecosfix (ANR-2010-STRA-003-01), le projet Safse (Cirad/IRD) et le projet Macacc (ANR-13-Agro-0005). Nous sommes très redevables à la famille Barquero et à Alexis Perez pour une assistance sur le terrain et à Patricia Leandro pour les installations de laboratoire du Catie.

Bibliographie

Benegas L., Ilstedt U., Roupsard O., Jones J., Malmer A., 2014. Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America. *Agriculture, ecosystems & environment*, 183(0): 185-196.

Cambou A., Barthès B., Clement-Vidal A., Thaler P., Charbonnier F., Van Den Meersche K., Avelino J., DavrieuxvF., Labouisse J.-P., Aguilar M.H., De Melo Virginio Filho E., Deleporte P., Brunet D., Gay A., Lehner P., Roupsard O., subm. Why is Coffea arabica exhausted after just a few years of yield? Starch sink in perennial stumps competes but ensures survival. *Tree Physiology*. (Submitted 26th of April 2017, rejected, to be re-submitted).

Charbonnier F., Le Maire G., Dreyer E., Casanoves F., Christina M., Dauzat J., Eitel J.U.H., Vaast P., Vierling L.A., Roupsard O., 2013. Competition for light in heterogeneous canopies: Application of Maestra to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system. *Agricultural and forest meteorology*, 181: 152-169.

Charbonnier F., Roupsard O., Le Maire G., Guillemot J., Casanoves F., Lacointe A., Vaast P., Allinne C., Audebert L., Cambou A., Clement-Vidal A., Defrenet E., Duursma R.A., Jarri L., Jourdan C., Khac E., Leandro P., Medlyn B.E., Saint-Andre L., Thaler P., Van Den Meersche K., Aguilar A.B., Lehner P., Dreyer E., 2017. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. *Plant cell and environment*, 40(8): 1 592-1 608.

De Melo Virginio Filho E., Arrieta S., Escobedo Aguilar A., Rapidel B., Roupsard O., 2015. Validación de Piloto de Sistemas Agroforestales en el ámbito de la Nama-Café Costa Rica (Propuesta para ejecución en 2016). Annexo 2. Catie, Cirad, Fundecooperacion, Icafe, MAG. 30 p., Diseño piloto de sistemas agroforestales en el ámbito de la Nama-Café Costa Rica, 16 p.

Defrenet E., Roupsard O., Van Den Meersche K., Charbonnier F., Pastor Pérez-Molina J., Khac E., Prieto I., Stokes A., Roumet C., Rapidel B., De Melo Virginio Filho E., Vargas V.J., Robelo D., Barquero A., Jourdan C., 2016. Root biomass, turnover and net primary productivity of a coffee agroforestry system in Costa Rica: effects of soil depth, shade trees, distance to row and coffee age. *Annals of botany*, 118(4): 833-851.

Gómez-Delgado F., 2010. Hydrological, ecophysiological and sediment processes in a coffee agroforestry basin: combining experimental and modelling methods to assess hydrological environmental services. Thèse de doctorat, Montpellier, SupAgro ; École doctorale Systèmes intégrés en biologie, agronomie, géosciences, hydrosciences, environnement. Montpellier, 254 p.

Gómez-Delgado F., Roupsard O., Le Maire G., Taugourdeau S., Perez A., Van Oijen M., Vaast P., Rapidel B., Harmand J.-M., Voltz M., Bonnefond J.-M., Imbach P., Moussa R., 2011. Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and earth system sciences*, 15(1): 369-392.

Hasselquist N.J., Benegas L., Roupsard O., Malmer A., Ilstedt U., 2018. Canopy cover effects on local soil water dynamics in a tropical agroforestry system: Evaporation drives soil water isotopic enrichment. *Hydrological processes*, 32(8): 994-1 004.

Isaac M.E., Martin A.R., de Melo Virginio Filho E., Rapidel B., Roupsard O., Van den Meersche K., 2017. Intraspecific trait variation and coordination: root and leaf economics spectra in coffee across environmental gradients. *Frontiers in plant science*, 8: 1 196.

Kim J.H., Fourcaud T., Jourdan C., Maeght J.L., Mao Z., Metayer J., Meylan L., Pierret A., Rapidel B., Roupsard O., de Rouw A., Sanchez M.V., Wang Y., Stokes A., 2017. Vegetation as a driver of temporal variations in slope stability: The impact of hydrological processes. *Geophysical research letters,* 44: 4 897-4 907.

Kinoshita R., Roupsard O., Chevallier T., Albrecht A., Taugourdeau S., Ahmed Z., Van Es H.M., 2016. Large topsoil organic carbon variability is controlled by Andisol properties and effectively assessed by VNIR spectroscopy in a coffee agroforestry system of Costa Rica. *Geoderma,* 262: 254-265.

Le Maire G., Rançon F., Charbonnier F., Roupsard O., 2014. Characterizing the structure of a coffee agroforestry systems in Costa Rica. Poster, *In: Pleiades days*. 1-3 avril 2014. Toulouse, France.

Martin A.R., Rapidel B., Roupsard O., Van Den Meersche K., Virginio E.D., Barrios M., Isaac M.E., 2017. Intraspecific trait variation across multiple scales: the leaf economics spectrum in coffee. *Functional ecology*, 31(3): 604-612.

Prieto I., Roumet C., Cardinael R., Dupraz C., Jourdan C., Kim J.H., Maeght J.L., Mao Z., Pierret A., Portillo N., Roupsard O., Thammahacksa C., Stokes A., 2015. Root functional parameters along a land-use gradient: evidence of a community-level economics spectrum. *Journal of ecology*, 103(2): 361-373.

Roupsard O., 2015. La utilización de modelos para apoyar la validación de Innovaciones Agroforestales, In : Diseño de Piloto de Sistemas Agroforestales en el ámbito de la Nama-Café Costa Rica–Catie-Cirad-Fundecooperación-Icafe-MAG. Catie, 09 de Diciembre de 2015, Nama-Café Costa Rica Oral presentation.

Roupsard O., Van Den Meersche K., Alline C., Vaast P., Rapidel B., Avelino J., Jourdan C., Le Maire G., Bonnefond J.M., Harmand J.M., Dauzat J., Albrecht A., Chevallier T., Gómez-Delgado F., Charbonnier F., Benegas L., Welsh Unwala K.E., Kinoshita R., Vezy R., Perez Molina J.P., Kim J., Defrenet E., S T., Nespoulous J., Cambou A., Soma M., Mages C., Schnabel F., Prieto Aguilar I., Picart D., Duthoit M., Rocheteau A., Do F., De Melo Virginio Filho E., Moussa R., Le Bissonnais Y., Sanchez-Murillo R., Roumet C., Stokes A., Vierling L., Eitel J., Dreyer E., Saint-André L., Malmer A., Loustau D., Isaac M.E., Martin A., Priémé A., Elberling B., Madsen M., Robelo A., Robelo D., Borgonovo C., Lehner P., Ramirez L.G., Jara M., Acuna Vargas R., Barquero A., Fonseca C., Gay F., 2017. Eight years studying ecosystem services in a large coffee agroforestry observatory. Practical applications for the farmers, *In: World Coffee summit.* 31st May-3rd June 2017. El Salvador. Invited oral presentation.

Sánchez-Murillo R., Birkel C., Welsh K., Esquivel-Hernández G., Corrales-Salazar J., Boll J., Brooks E., Roupsard O., Sáenz-Rosales O., Katchan I., Arce-Mesén R., Soulsby C., Araguás-Araguás L.J., 2016. Key drivers controlling stable isotope variations in daily precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Eastern Pacific Ocean moisture sources. *Quaternary science reviews*, 131(Part B): 250-261.

Schnabel F., Virginio E.D., Xu S., Fisk I.D., Roupsard O., Haggar J., 2018. Shade trees: a determinant to the relative success of organic versus conventional coffee production. *Agroforestry systems*, 92(6): 1535-1549.

Soma M., Vezy R., Deswarte C., De Melo Virginio Filho E., Guilioni L., Le Maire G., Avelino J., Roupsard O., 2017. A simple model to predict the effect of Agroforestry on coffee canopy temperature. (en préparation) *Agricultural and forest meteorology.*

Taugourdeau S., Le Maire G., Avelino J., Jones J.R., Ramirez L.G., Quesada M.J., Charbonnier F., Gomez-Delgado F., Harmand J.-M., Rapidel B., Vaast P., Roupsard O., 2014. Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry. *Agriculture ecosystems and environment*, 192: 19-37.

Vezy R., Christina M., Roupsard O., Nouvellon Y., Duursma R., Medlyn B., Soma M., Charbonnier F., Blitz-Frayret C., Stape J.L., Laclau J.P., Virginio E.D., Bonnefond J.M., Rapidel B., Do F.C., Rocheteau A., Picart D., Borgonovo C., Loustau D., Le Maire G., 2018. Measuring and modelling energy partitioning in canopies of varying complexity using MAESPA model. *Agricultural and forest meteorology*, 253: 203-217.

Vezy R., Le Maire G., Christina M., Georgiou S., Imbach P., Hidalgo H.G., Alfaro E., Blitz-Frayret C., Picart D., Loustau D., Charbonnier F., Roupsard O, soumis 2019. Dynacof: A Process-Based Model to Study Growth, Yield and Ecosystem Services over Full Rotations of Coffee in Agroforestry', Agric. For. Met. Submitted May 2019.

Welsh K., Boll J., Sanchez-Murillo R., Roupsard O., 2018. Isotope hydrology of a tropical coffee agroforestry watershed: Seasonal and event-based analyses. *Hydrological processes*, 32(13) : 1965-1977.

Les auteurs

Albrecht Alain
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
alain.albrecht@ird.fr

Allinne Clémentine
Cirad, Ciheam-Iamm, Inra, Montpellier SupAgro, Université de Montpellier, UMR-System, Montpellier, France ;
Catie, Programma de agricultura, ganaderia y agroforesteria, Turrialba, Costa Rica
clementine.allinne@cirad.fr

Acuna Vargas R.
Hacienda Aquiares, Costa Rica
racuna@aquiares.com

Avelino Jacques
Cirad, Université de Montpellier, UPR-Bioagresseurs, Montpellier, France ;
Catie, Programma de agricultura, ganaderia y agroforesteria, Turrialba, Costa Rica
jacques.avelino@cirad.fr

Barquero A.
Hacienda Aquiares, Costa Rica
alebarquero2@gmail.com

Barthès Bernard
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
bernard.barthes@ird.fr

Benegas Laura
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica ;
Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Suède
Laura.Benegas@slu.se,
laura.benegas@catie.ac.cr

Bonnefond Jean-Marc
Inra, UMR-ISPA, Bordeaux, France
jean-marc.bonnefond@inra.fr

Borgonovo C.
Hacienda Aquiares, Costa Rica
cborgonovo4@gmail.com

Cambou Aurélie
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
Agrocampus Ouest, UPSP EPHor, Angers, France
aurelie.cambou5@gmail.com

Charbonnier F.
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica ;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica ;
El Colegio de la Frontera Sur, SCddc, Chiapas, México
charbonnier@ecosur.mx

Chevallier Tiphaine
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
tiphaine.chevallier@ird.fr

Clément-Vidal Anne
Cirad, UMR-AGAP, Montpellier, France
anne.clement-vidal@cirad.fr

Dauzat Jean
Cirad, Inra, UMR-Amap, Montpellier, France
jean.dauzat@cirad.fr

Defrenet Elsa
Agrocampus Ouest, Rennes, France
elsa.defrenet@gmail.com

de Melo Virginio Filho Elias
Catie, 7170 Turrialba, Costa Rica ;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica
eliasdem@catie.ac.cr

Do Frederic
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
frederic.do@ird.fr

Dreyer Erwin
Inra, UMR-EEF, Inra-Nancy, France
erwin.dreyer@inra.fr

Duthoit Maxime
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
maxime.duthoit@cirad.fr

Eitel J.
University of Idaho, États-Unis
jeitel@uidaho.edu

Elberling B.
University Copenhagen, Copenhagen, Danemark
be@ign.ku.dk

Fonseca C.
Icafe, Costa Rica
cfonseca@icafe.cr

Gay Frédéric
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica ;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica
frederic.gay@cirad.fr

Gómez-Delgado F.
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
ICE - Costa Rican Institute of Electricity, Costa Rica ;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica ;
World Meteorological Organization (WMO), Costa Rica
eduardogranados30@gmail.com

Guidat Florian
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
florian.guidat22@gmail.com

Harmand Jean-Michel
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
Icraf (World Agroforestry) Nairobi, Kenya
jean-michel.harmand@cirad.fr

Isaac Marney
DPES, University of Toronto, Scarborough, Canada
marney.isaac@utoronto.ca

Jara Manuel
Hacienda Aquiares, Costa Rica
manueljaraq@yahoo.es

Jourdan Christophe
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
Inra, Montpellier SupAgro, UMR-Lisah, France
christophe.jourdan@cirad.fr

Kim J.
Cirad, Inra, UMR-Amap, Montpellier, France
jkim@bgc-jena.mpg.de

Kinoshita R.
Cornell University, États-Unis
rk422@cornell.edu

Le Bissonnais Yves
Inra, Montpellier SupAgro, UMR-Lisah, Montpellier, France
lebisson@supagro.inra.fr

Lehner Peter-Hans
Hacienda Aquiares, Costa Rica
peterhanslehner@gmail.com

Le Maire Guerric
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
guerric.le_maire@cirad.fr

Loustau Denis
Inra, UMR-ISPA, Bordeaux, France
denis.loustau@inra.fr

Madsen Mikael
University Copenhagen, Copenhagen, Danemark
Mikael.Madsen@jur.ku.dk

Mages C.
University Copenhagen, Copenhagen, Danemark
fmz403@alumni.ku.dk

Malmer Anders
Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Suède
anders.malmer@slu.se

Martin Adam
DPES, University of Toronto, Scarborough, Canada
adam.martin@utoronto.ca

Moussa Rachida
Inra, Montpellier SupAgro, UMR-Lisah, Montpellier France
moussa@supagro.inra.fr

Nespoulous Jérôme
Cirad, Inra, UMR-Amap, Montpellier, France
jerome.nespoulous@cirad.fr

Pérez Molina J.P.
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica ;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica ;
Federal University of Viçosa, Brazil ;
Montpellier SupAgro, Montpellier, France
jpastorpm@gmail.com

Picart Delphine
Inra, UMR-Ispa, Bordeaux, France
delphine.deshors-picart@inra.fr

Priemé A.
University Copenhagen, Copenhagen, Danemark
aprieme@bio.ku.dk

Prieto Ivan
CNRS, Cefe UMR-5 175, Montpellier, France
ivan.prieto@cefe.cnrs.fr

Ramirez Guillermo
Hacienda Aquiares, Costa Rica
guiller2151@yahoo.es

Rançon Florian
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
florian.rancon@ims-bordeaux.fr

Rapidel Bruno
Cirad, Ciheam-Iamm, Inra, Montpellier SupAgro, Université de Montpellier, UMR-System, Montpellier, France ;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica
bruno.rapidel@cirad.fr

Robelo D.
Hacienda Aquiares, Costa Rica
drobelo@aquiares.com

Rocheteau Alain
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
alain.rocheteau@ird.fr

Roumet Catherine
CNRS, Cefe UMR-5175, Montpellier, France
catherine.roumet@cefe.cnrs.fr

Roupsard Olivier
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica ;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica ;
LMI IESOL (IRD/Isra/Ucad/Cirad), Dakar, Sénégal
olivier.roupsard@cirad.fr

Saint-André L.
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
Inra, UR-BEF, Nancy, France
st-andre@nancy.inra.fr

Sánchez-Murillo Ricardo
UNA, Stable Isotope Research Group, Costa Rica
ricardo.sanchez.murillo@una.cr

Schnabel Florian
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica ;
FENR, University of Freiburg, Allemagne
florian.schnabel@idiv.de

Soma Maxime
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
UR-Écologie des Forêts Méditerranéennes, Inra, Avignon, France
maxime.soma@inra.fr

Stokes Alexia
Cirad, Inra, UMR-Amap, Montpellier, France
alexia.stokes@cirad.fr

Taugourdeau Simon
Cirad, UMR-Selmet, Montpellier, France
simon.taugourdeau@cirad.fr

Vaast Philippe
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
Icraf (World Agroforestry) Nairobi, Kenya
philippe.vaast@cirad.fr

Valentin Christian
IRD, UMR-IEES, Paris, France
christian.valentin@ird.fr

Van den Meersche Karel
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France ;
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica ;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica
karel.van_den_meersche@cirad.fr

Vezy Rémi
Université de Bordeaux, Bordeaux, France ;
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
remi.vezy@inra.fr, remi.vezy@cirad.fr

Vierling Lee
University of Idaho, États-Unis ;
Catie, 7170 Turrialba, Costa Rica
leev@uidaho.edu

Welsh Kristen
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica ;
University of Idaho, États-Unis
kristen.unwala@ub.edu.bs

Update Sciences & technologies

AGROFORESTERIE ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES EN ZONE TROPICALE

Josiane Seghieri et Jean-Michel Harmand, coordinateurs

éditions Quæ

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/