

Tiphaine Chevallier, Tantely M. Razafimbelo, Lydie Chapuis-Lardy et Michel Brossard (dir.)

Carbone des sols en Afrique Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles

IRD Éditions

Chapitre 9. Restauration agro-écologique des sols de savanes d'Afrique de l'Ouest avec des rameaux d'arbres

Raphaël J. Manlay, Bernard G. Barthès, Anne-Sophie Cabral, Philippe Deleporte, Edmond Hien, Guillaume Kabré et Aurélien Penche

DOI : 10.4000/books.irdeditions.35037

Éditeur : IRD Éditions, FAO

Lieu d'édition : Rome, Marseille

Année d'édition : 2020

Date de mise en ligne : 16 décembre 2020

Collection : Synthèses

ISBN électronique : 9782709928373



<http://books.openedition.org>

Édition imprimée

Date de publication : 1 septembre 2020

Référence électronique

MANLAY, Raphaël J. ; et al. *Chapitre 9. Restauration agro-écologique des sols de savanes d'Afrique de l'Ouest avec des rameaux d'arbres* In : *Carbone des sols en Afrique : Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles* [en ligne]. Rome, Marseille : IRD Éditions, 2020 (généré le 18 décembre 2020).

Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/35037>>. ISBN : 9782709928373.

DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.35037>.

Restauration agro-écologique des sols de savanes d'Afrique de l'Ouest avec des rameaux d'arbres

*Raphaël J. MANLAY, Bernard G. BARTHÈS,
Anne-Sophie CABRAL, Philippe DELEPORTE,
Edmond HIEN, Guillaume KABRÉ,
Aurélien PENCHE*

Amender le sol avec du bois raméal : état des connaissances

L'application de branches d'arbres (bois de rameaux ou raméal, BR) aux sols pour leur conservation ou leur restauration fait l'objet d'un intérêt régulier dans les cercles francophones liés aux pratiques alternatives en agriculture (ASSELINÉAU et DOMENECH, 2007 ; DODELIN *et al.*, 2007 ; PIŠKUR *et al.*, 2013). Cet usage a été substantiellement évalué scientifiquement pour la première fois au Québec dans les années 1980 et 1990, entre autres à la demande de la compagnie Hydro-Québec, qui cherchait une valorisation aux résidus issus de l'élagage des arbres le long de ses lignes électriques. La technique fut ensuite promue par le Groupe de coordination sur les bois raméaux de l'université Laval, qui développa le concept d'aggradation (par opposition à dégradation) du sol (LEMIEUX, 1997). Pour des raisons encore à identifier, la pratique a recueilli peu d'attention des scientifiques, en dehors du Québec.

Pourtant, les fondements théoriques de l'amélioration des sols par l'apport de branches sont séduisants. La pratique s'inscrit dans une logique d'imitation de l'écosystème naturel afin d'engendrer des nouveaux services dérivés des fonctions recréées (ALTIERI, 2002). L'écosystème naturel est le modèle car il est

le produit de la pression évolutive par les conditions locales, et donc théoriquement le plus résilient. L'apport de bois raméal vise ainsi à imiter, en sol cultivé, le « patron » des apports organiques existant dans les sols forestiers considérés comme fertiles et stables. Une hypothèse est que l'impact de ces apports est fortement lié à leurs qualités biochimiques (richesse en lignine faiblement polymérisée, teneur minérale équilibrée), qui stimule les champignons plutôt que les bactéries. Ces qualités sont garanties du fait que seul du bois de $\varnothing < 7$ cm est recommandé. La diversification des chemins trophiques entraîne celle des formes de vie dans le sol, l'amélioration des propriétés du sol, et finalement la croissance des plantes. Le carbone apporté a autant vocation à être utilisé comme source d'énergie pour maintenir l'organisation de l'écosystème qu'à être stocké de façon durable sous forme d'humus (PERRY *et al.*, 1989). Évaluée en milieu tempéré, la pratique a abouti à la recommandation d'une fragmentation préalable afin d'accélérer le processus de décomposition limité par la température.

Un état antérieur des connaissances scientifiques sur l'impact de l'apport de bois raméal au sol sur l'agroécosystème (BARTHÈS *et al.*, 2010) suggère un effet généralement positif sur les propriétés du sol et les performances de la plante cultivée. Mais il interroge la pertinence du témoin utilisé pour évaluer l'intérêt du bois raméal par rapport à d'autres pratiques de fertilisation, ce témoin étant un traitement sans apport de fertilisant. Par ailleurs, en agriculture familiale tropicale, les arbres sont régulièrement exploités pour produire du bois d'œuvre et de chauffe et du fourrage : le bois raméal est donc une ressource, dont l'usage à des fins d'amendement entre en compétition avec d'autres utilisations. Alors que la pratique est de plus en plus présentée comme un remède à la crise socio-environnementale que traversent les agricultures du Sud, une évaluation scientifique de ses performances et de sa faisabilité en milieu tropical est nécessaire, surtout lorsque c'est à l'agriculture de subsistance que s'adresse un discours mêlant faits et postulats.

Ce chapitre synthétise les premiers travaux d'un programme de recherche mené conjointement au Burkina Faso par l'Institut de recherche pour le développement (IRD), l'université de Ouagadougou, et l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech). Il postule que les services écosystémiques des sols des savanes ouest-africaines doivent être améliorés, et vise à tester trois hypothèses : (1) les propriétés des sols de savane et les performances des plantes cultivées peuvent être améliorées en utilisant des amendements raméaux, (2) les branches sont une forme d'apport organique au sol fonctionnellement particulière et (3) la disponibilité de la ressource en branches dans les territoires villageois ne limite pas l'adoption de cette pratique en milieu paysan.

Les deux premières hypothèses ont été testées par un dispositif expérimental en station qui fait l'objet de la prochaine section, tandis que l'hypothèse (3) a été évaluée par une analyse de la disponibilité de la ressource à l'échelle de deux terroirs villageois (voir page 181).

Impact de l'amendement du sol avec du bois raméal sur la plante et le sol

Site d'étude

Le volet expérimental du projet a été développé sur la station expérimentale de Gampela (12°24'35"N, 1°21'05"O), sur Endogleyic Acrisol (FAO, 2015) sous des pluviométrie et température annuelles moyennes (1997-2006) de 692 mm de mai à octobre et de 28°C, respectivement.

Le dispositif a été maintenu de 2007 à 2013. Cette section ne rapporte que les résultats du plan expérimental de la première phase (2007-2009), par ailleurs consignés plus en détail dans BARTHÈS *et al.* (2015) ; les résultats de la deuxième phase sont présentés dans FÉLIX *et al.* (2018). Le dispositif a été conçu pour tester les hypothèses suivantes : (1) l'application de bois raméal fragmenté (BRF) améliore le rendement des cultures (niveau et stabilité) et les propriétés du sol par rapport à (a) aucun apport ou (b) l'apport de matière organique sous forme de paille ; (2) l'impact est déterminé par la forme du carbone apporté plus que par les éléments nutritifs liés ; (3) l'impact dépend de la manière dont les branches sont appliquées (enterré vs mulch).

Six traitements ont été appliqués selon quatre blocs par parcelles de 5 * 6 m² : (1) témoin : pas d'apport ; (2) BrfEn : 1,5 t MS¹.ha⁻¹ de BRF enterré ; (3) BrfMu : BrfEn mais en mulch ; (4) BrfEn+N : BrfEn + 9,6 kg N¹.ha⁻¹ ; (5) PaEn : 1,6 t MS.ha⁻¹ de paille enterrée + 9,6 kg N¹, 0,65 kg P¹, 0,75 kg K¹.ha⁻¹ ; (6) PaMu : PaEn, mais en mulch. Le BRF a été produit à partir de *Piliostigma reticulatum* (DC.) Hochst, un arbuste commun de la zone (teneurs moyennes en carbone (C), N P et K des branches feuillées : respectivement 46,2, 1,31, 0,09 et 0,88 g.100g⁻¹ MS). L'apport en NPK sur paille était du même niveau que celui engendré par l'apport de BRF. La plante test était *Sorghum bicolor* (L.) Moench, var. *Sariasso*. Les variables à prédire, mesurées, étaient les composantes du rendement (tabl. 1), et certaines propriétés chimiques et biologiques du sol (caractérisées selon PANSU et GAUTHEYROU, 2006). Les placages de termites ont été caractérisés par leur abondance sur quadrat de 1 m², en 2008 seulement, entre l'application des matières organiques et les premières pluies. Les résultats ont été analysés par des analyses de variance pour les placages de termites et la variabilité interannuelle des rendements, et de covariance pour les autres variables à expliquer (les teneurs en carbone total – C_t – et P disponible (Olsen) – P_d – de la couche de sol 0-5 cm, mesurées avant expérimentation étant traitées comme covariables en raison de différences initiales inter-blocs possiblement significatives) et par comparaisons multiples de moyennes (EVERITT et SKRONDAL, 2010) avec le logiciel XLstat 2008 v6.01 (Addinsoft, Paris). Pour la suite, le risque de première espèce (α) choisi est de 0,05.

1 MS : matière sèche. N : azote. P : phosphore. K : potassium.

Tableau 1
Effet de l'application de bois raméal fragmenté de *Ptilostigma reticulatum* sur la plante et le sol.

Variable à expliquer	Année/ date	Profondeur du sol (cm)	Moyenne ± erreur-type (n=4) par traitement						P(H ₀ : F _{obs} > F _{th} = 0)
			Témoïn	BrfEn	BrfMu	BrfEn+N	PaEn	PaMu	
Rendement grain (t.ha ⁻¹)	2007	-	0,74 ± 0,21	0,81 ± 0,11	0,88 ± 0,04	0,99 ± 0,11	0,92 ± 0,17	0,87 ± 0,18	
	2008	-	0,16 ± 0,04	0,25 ± 0,06	0,39 ± 0,10	0,52 ± 0,19	0,49 ± 0,10	0,43 ± 0,13	
	2009	-	0,28 ± 0,18	0,17 ± 0,05	0,36 ± 0,13	0,27 ± 0,07	0,24 ± 0,04	0,38 ± 0,11	*
	2007-2009	-	1,18 ± 0,38	1,23 ± 0,13	1,63 ± 0,17	1,78 ± 0,34	1,65 ± 0,26	1,67 ± 0,42	
Rendement paille (t.ha ⁻¹)	2007	-	2,79 ± 0,56	2,98 ± 0,27	3,39 ± 0,33	3,47 ± 0,21	3,25 ± 0,34	3,21 ± 0,45	
	2008	-	0,99 ± 0,21 b	1,38 ± 0,14ab	2,02 ± 0,39ab	2,64 ± 0,69a	2,50 ± 0,43ab	2,11 ± 0,51ab	*
	2009	-	0,68 ± 0,37	0,51 ± 0,13	0,78 ± 0,25	0,70 ± 0,16	0,71 ± 0,07	0,93 ± 0,21	*
	2007-2009	-	4,46 ± 0,96	4,86 ± 0,25	6,19 ± 0,63	6,81 ± 0,84	6,46 ± 0,75	6,24 ± 1,13	
Masse 1 000 grains (g)	2008	-	11,6 ± 0,53 b	13,0 ± 0,54a	13,5 ± 0,27ab	13,5 ± 0,35a	13,7 ± 0,15a	12,9 ± 0,71a	*
	2009	-	15,8 ± 1,07	17,2 ± 0,61	18,2 ± 1,80	16,9 ± 2,07	20,9 ± 1,07	17,3 ± 2,29	
	Avril 2007 (t0)	0-5	3,3 ± 0,22	3,59 ± 0,23	3,41 ± 0,19	3,33 ± 0,20	3,29 ± 0,18	3,56 ± 0,18	***
C total (g.kg ⁻¹)	Récolte 2008	0-5	3,12 ± 0,13	3,19 ± 0,11	3,2 ± 0,12	3,08 ± 0,25	3,13 ± 0,19	3,3 ± 0,23	*
		5-15	3,64 ± 0,14ab	3,67 ± 0,16a	3,47 ± 0,13ab	3,04 ± 0,12c	3,33 ± 0,09bc	3,46 ± 0,22ab	*
	Récolte 2009	0-5	3,05 ± 0,21	3,13 ± 0,12	3 ± 0,20	2,9 ± 0,27	3,01 ± 0,14	3,35 ± 0,21	*
		5-15	3,52 ± 0,12	3,37 ± 0,10	3,49 ± 0,30	3,16 ± 0,19	3,48 ± 0,30	3,37 ± 0,17	*

Variable à expliquer	Année/ date	Profondeur du sol (cm)	Moyenne ± erreur-type (n=4) par traitement						P(H ₀ : F _{obs} > F _{th} = 0)				
			Témoin	BrfEn	BrfMu	BrfEn+N	PaEn	PaMu	Trait.	Bloc	C à T ₀	P à T ₀	
N total (g.kg ⁻¹)	Avril 2007 (t0)	0-5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Récolte 2008	0-5	0,220±0,007	0,220±0,007	0,233±0,010	0,228±0,014	0,230±0,008	0,238±0,015					
		5-15	0,243±0,008	0,240±0,007	0,235±0,014	0,218±0,006	0,223±0,003	0,235±0,014					
	Récolte 2009	0-5	0,248±0,028	0,245±0,012	0,245±0,019	0,228±0,017	0,228±0,005	0,253±0,014					
		5-15	0,273±0,013	0,248±0,011	0,260±0,021	0,233±0,019	0,260±0,031	0,243±0,003	*				
P _d (mg.kg ⁻¹)	Avril 2007 (t0)	0-5	7,610±0,77	8,460±0,21	7,830±0,68	7,820±0,42	7,980±0,37	7,890±0,59	***	ND	ND	ND	ND
	Récolte 2008	0-5	11,41±1,24	13,22±1,46	14,75±1,26	10,01±1,39	10,17±0,81	11,27±1,25					
		5-15	11,67±1,10	13,56±2,22	9,710±0,36	12,46±2,02	10,47±0,82	13,25±2,47					
	Récolte 2009	0-5	5,750±1,03 a	4,500±0,87b	7,000±1,08a	4,750±0,25b	4,500±0,65b	6,500±0,96a	***	*	*	***	***
		5-15	3,750±1,89	1,500±0,50	2,750±0,85	3,000±1,35	3,500±1,85	3,250±0,95					
Placages de termites (%)	2008	-	0,6±0,2 b	10,8±1,1a	10,1±1,7a	8,1±0,5a	1,2±0,3b	2,1±0,8b	***	ND	ND	ND	ND

* P(H₀:F_{obs} > F_{th} = 0) < 0,05
 ** P(H₀:F_{obs} > F_{th} = 0) < 0,01
 *** P(H₀:F_{obs} > F_{th} = 0) < 0,001
 ND : non déterminé.

Résultats

Sauf en 2009, le traitement Témoin a enregistré les plus faibles performances pour la plante tandis que BrfEn+N présentait les meilleurs rendements (tabl. 1). En raison d'une forte variabilité inter-blocs, les traitements n'ont cependant pas eu d'effet significatif sur les performances des cultures, sauf en 2008 sur le rendement en paille (BrfEn+N = PaEn > Témoin). Le traitement BrfEn+N a également présenté le rendement en grain cumulé sur les trois années le plus élevé (50 % de plus que Témoin), mais sans différence significative. La variabilité interannuelle du rendement en grain n'a pas varié selon les traitements (données non présentées).

L'application de bois raméal n'a pas eu d'impact clair sur les propriétés chimiques du sol après deux ou trois années d'application (tabl. 1). La teneur en C_t n'a différé significativement qu'en 2008 pour l'horizon 5-15 cm, avec un maximum obtenu sous BrfEn et un minimum sous traitement équivalent additionné de N (BrfEn+N). La teneur en azote total n'a jamais différé entre traitements. Celle en P_d a différé significativement uniquement en 2009 et pour le seul horizon 0-5 cm, la discrimination étant menée par la forme de l'application plutôt que par la nature de l'apport (BrfMu = PaMu = Témoin > BrfEn+N = BrfEn = PaEn). Sans considérer un niveau de significativité, le traitement PaMu avait les plus fortes teneurs en C et N pour quatre des neuf mesures de C_t et N_t , tandis que BrfEn+N enregistrait les valeurs les plus faibles pour six des neuf mesures. Les teneurs en C_t et P_d ont eu tendance à baisser pendant l'expérimentation, avec une baisse significative de C_t seulement pour BrfMu et sur 0-5 cm, mais avec une baisse de P_d significative pour PaMu, Témoin, BrfEn+N et BrfEn sur 0-5 cm et BrfMu, BrfEn+N et BrfEn sur 0-15 cm.

Les placages de termites ont été significativement plus élevés (4 à 18 fois) sur les traitements avec BRF que sur les autres traitements (tabl. 1).

Discussion

Ces résultats divergent avec d'autres études indiquant une augmentation du rendement en grains suite à l'application de BRF en milieu tropical même à faible dose (BARTHÈS *et al.*, 2010). WEZEL et BOCKER (1999) en particulier, sous un climat comparable et avec une dose d'apport faible (1 t MS.ha⁻¹.an⁻¹ ou moins) ont ainsi observé une augmentation des rendements de mil de 70 à 80 % après application de branches non fragmentées en mulch ; cependant, en raison d'une forte variabilité cette augmentation n'était pas significative. En revanche, SOUMARE *et al.* (2002) n'ont observé, toujours en climat tropical sec, qu'une augmentation de 10 à 25 % de rendement, pourtant avec des apports de BRF bien supérieurs (4 à 16 t MS.ha⁻¹.an⁻¹) et issus de *Casuarina equisetifolia* L., espèce fixatrice d'azote. La seule étude connue de l'impact du BRF sur le sol en milieu tropical, en dehors du site de Gampela (SOUMARE *et al.*, 2002), diverge avec la présente étude ; elle indique en effet une augmentation de 40 % de la

teneur en carbone du sol par rapport à un traitement sans apport, mais cette différence n'était pas significative.

L'absence de tendance généralisable en conditions tropicales sèches suggère une diversité des patrons d'action des BRF, qui pourrait dépendre des conditions écologiques locales. Dans la présente étude, la stimulation de l'activité des termites peu après l'apport de BRF suggère une médiation large par ces insectes, déjà observée dans la région pour d'autres types de mulch par MANDO (1997) et ROULAND *et al.* (2003) et pour les racines d'arbres (MANLAY *et al.*, 2004). La redistribution horizontale de la matière organique par les termites limiterait l'impact immédiat de l'amendement ligneux sur le carbone du sol ; elle pourrait aussi expliquer la difficulté à mettre en évidence un impact sur les rendements, bien que les termites impactent plutôt positivement la productivité végétale en zone tropicale sèche (EVANS *et al.*, 2011 ; KAISER *et al.*, 2017). L'interprétation n'est pas limitée par la seule variabilité spatiale ; en effet, les trois années d'expérimentation ont été contrastées dans la distribution de la pluviosité.

Ces résultats et interprétations suggèrent que davantage de recherches sont nécessaires pour évaluer correctement le potentiel agro-écologique du bois raméal. Ces recherches doivent s'inscrire dans le moyen terme pour recouvrir plus complètement la variabilité interannuelle climatique. Elles doivent également tenir compte de l'importance des termites dans le cycle local de la matière organique. À cette fin doivent être évalués (1) l'apport de bois raméal non fragmenté au sol, qui convient sans doute mieux à la biologie des termites et au faible équipement des exploitations agricoles locales, et (2) l'impact de ces amendements sur les propriétés hydro-physiques du sol (le rôle des termites dans le maintien d'une porosité du sol étant bien établi, voir par exemple MANDO, 1997) et biologiques (les sols de savane étant des systèmes très dissipatifs en carbone, voir par exemple MANLAY *et al.*, 2002). Les influences de doses plus importantes (mais moins réalistes) et de l'espèce ligneuse source pour le bois raméal doivent également être étudiées (comme fait par FÉLIX *et al.*, 2018) pour vérifier l'existence de seuils d'apport et tester la sensibilité de l'écosystème à la qualité de l'apport (notamment teneurs en N et P). Enfin, une approche plus mécaniste des déterminants de la dynamique du bois raméal après son application doit être entreprise (MANLAY *et al.*, 2004).

Disponibilité de la ressource en bois raméal

Le projet a également caractérisé l'état de la ressource en bois raméal en milieu paysan, afin d'en évaluer la disponibilité pour un usage agro-écologique. Cette partie s'appuie, entre autres, sur les mémoires académiques de KABRÉ

(2010) et CABRAL (2011). Pour cela, deux grandeurs de cette ressource ont été abordées : le stock initial sur individu jamais taillé (ou pas taillé depuis longtemps), et la production par individu élagué récemment (c'est-à-dire la fixation nette moyenne annuelle depuis la dernière taille). La première grandeur est nécessaire pour évaluer la disponibilité initiale de la ressource en bois raméal avant adoption de l'amendement du sol par les branches, tandis que la seconde évalue sa disponibilité en « routine » (sous un régime de taille régulière après adoption). Trois objectifs spécifiques étaient fixés : (1) produire des modèles de prédiction de la biomasse raméale stockée et produite individuellement, adaptés à des inventaires forestiers de qualité variable, (2) évaluer la biomasse raméale disponible et sa répartition sur deux territoires villageois à climat contrasté, et (3) explorer les conditions de viabilité de la pratique d'amendement du sol avec du bois raméal sur un des territoires selon un scénario de gestion.

Matériel et méthodes

Les travaux ont été menés dans deux territoires villageois du Burkina Faso : Guié et Loukoura (respectivement 47,3 et 15,7 km²). Guié (province de l'Oubritenga, 1°33'35"O, 12°43'38"N) a un climat soudano-sahélien et est situé entre les isohyètes 600 et 700 mm (ARDOIN-BARDIN *et al.*, 2010). Loukoura (province de la Bougouriba, 3°24'3"O, 10°45'11"N) a un climat soudanien unimodal (entre les isohyètes 900 et 1 200 mm).

Les modèles de prédiction (tabl. 2) ont été construits pour les espèces les plus représentées sur chaque site (cinq espèces à Guié, six à Loukoura, tabl. 3). Quinze à trente individus de dimensions variables ont été analysés par espèce et par site. Chaque individu a été caractérisé – diamètres du tronc à la base et à 1,3 m, hauteur, surface de la projection du houppier et, uniquement à Loukoura et pour *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn et *Parkia biglobosa* (Jacq.) R.Br., le temps écoulé depuis la dernière taille – puis taillé manuellement. Les produits de taille ont été séparés entre feuilles et branches épaisses ($2 \leq \varnothing \leq 7$ cm) et fines ($\varnothing < 2$ cm) (seules les branches fines ne sont pas utilisées actuellement, et sont donc réellement disponibles comme amendement). Leurs masses fraîches et sèches ont été déterminées. Les masses sèches des trois compartiments ont été ajustées, selon différents modèles, aux grandeurs dendrométriques (ainsi qu'au temps depuis la dernière taille pour les modèles de production, élaborés seulement à Loukoura et pour *Vitellaria paradoxa* et *Parkia biglobosa*, deux espèces d'intérêt économique majeur localement).

Un modèle pour chaque espèce et un modèle multispécifique ont été retenus par compartiment après sélection parmi les sept modèles du tableau 2 selon plusieurs critères (puissance, robustesse et, pour Guié, parcimonie).

Des inventaires forestiers systématiques ont été faits sur chaque terroir sur 72 et 62 placettes géoréférencées (taux de sondage : 0,38 et 0,25 %) à Guié et Loukoura respectivement. Pour chaque tige de $\varnothing \geq 5$ cm, l'espèce et les grandeurs

Tableau 2
Modèles individuels de stock et de production de biomasse raméale testés.

Formes	Équations
1	$y = a \times X^b$ avec $X \in \{D_0 ; D_{130}\}$
2	$y = a \times (D_{130}^2 \times H)^b$
3	$y = a \times D_{130}^b \times H^c$
4	$y = a + b \times D_0 + c \times D_{130} + d \times H + e \times S_{houppier}$
5	$y = a + D_{130}^b \times H^c \times \rho^d$
6	$y = a + b \times D_0 + c \times D_{130} + d \times H + e \times S_{houppier}$
7	$\text{Log}_{10}(y) = a + b \times D_0 + c \times T$

Avec y le stock ou la production de biomasse sèche, D_0 et D_{130} les diamètres du tronc, respectivement 0 et 1,30 m (en cm), H la hauteur de l'arbre (en m), $S_{houppier}$ la surface de la projection du houppier (en m^2), T la durée depuis le dernier émondage (en années), ρ la densité du bois (en $kg\ MS.dm^{-3}$) et a, b, c, d et e les paramètres à estimer.

dendrométrie citées ci-dessus ont été caractérisées ; les autres tiges ont été comptées et pesées et leur espèce déterminée. Les modèles individuels de stock de biomasse ont été croisés avec les inventaires pour estimer la biomasse sur chaque placette, en utilisant conjointement modèles spécifiques et multispécifiques (selon l'espèce inventoriée). La propagation de l'erreur liée à l'utilisation des modèles a été estimée pour chaque compartiment aux échelles de l'arbre, de la placette, et de la surface d'inventaire considérée comme représentative de celle effectuée à l'échelle du terroir.

Les teneurs en N et P des branches fines et des feuilles des six espèces étudiées à Loukoura ont été mesurées.

Des simulations ont été effectuées sous tableur pour estimer l'évolution temporelle de la disponibilité de la ressource (résultant du bilan entre les entrées – production par fixation photosynthétique – et sorties – récolte par émondage) sous un scénario peu ambitieux : la densité d'arbre est maintenue identique à l'actuelle, la proportion de surface cultivée fertilisée annuellement est de 30 %, et l'apport annuel de bois raméal est fixé à 1,5 t MS.ha⁻¹. Ces simulations ont été faites uniquement pour les peuplements à *Vitellaria paradoxa* et *Parkia biglobosa*, seules espèces pour lesquels des modèles individuels de production ont été construits.

Résultats

Stocks de biomasse arbustive sur les territoires

Les formes des meilleurs modèles diffèrent selon le compartiment et l'espèce (tabl. 3), les meilleurs modèles n'étant pas forcément les plus complexes en raison du critère de parcimonie introduit.

Tableau 3
Paramètres des meilleurs modèles individuels de stock et de production de biomasse ramée.

Espèce	Site	Compartment	Variable prédictive	Forme du modèle*	Valeur des paramètres*				
					a	b	c	d	e
<i>Cassia sieberiana</i>	Guié	Rameau Ø < 2 cm	Stock	I avec X = D _{I30}	0,059	2,037			
		Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	I avec X = D _{I30}	0,054	2,283			
<i>Combretum micranthum</i>	Guié	Feuille	Stock	4		0,072			
		Rameau Ø < 2 cm	Stock	4		0,361			
<i>Guiera senegalensis</i>	Guié	Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	4	-4,251	0,547	1,434		
		Feuille	Stock		Aucun modèle testé : espèce défeuillée lors de l'échantillonnage				
<i>Ptilostigma reticulatum</i>	Guié	Rameau Ø < 2 cm	Stock	4	-0,492	0,293			0,181
		Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	4		0,380			
<i>Vitellaria paradoxa</i>	Guié	Feuille	Stock	4	-0,233	0,052			0,049
		Rameau Ø < 2 cm	Stock	4		0,684			
<i>Multispécifique</i>	Guié	Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	2	0,142	0,664			
		Feuille	Stock	4		-0,247	0,445		
<i>Burkea africana</i>	Loukoura	Rameau Ø < 2 cm	Stock	4	0,082	0,947	1,578		
		Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	4	-13,768	2,302			
<i>Multispécifique</i>	Guié	Feuille	Stock	4	-4,578	0,620			
		Rameau Ø < 2 cm	Stock	5	0,000	1,269	1,001	6,720	
<i>Burkea africana</i>	Loukoura	Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	2	0,265	0,602			
		Feuille	Stock	2	0,01	0,81			
<i>Burkea africana</i>	Loukoura	Rameau Ø < 2 cm	Stock	4	24,93			-1,15	0,50
		Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	4	3,16			-7,20	1,89
<i>Burkea africana</i>	Loukoura	Feuille	Stock	4	0,01			-0,90	0,40

Espèce	Site	Compartment	Variable prédiée	Forme du modèle*	Valeur des paramètres*				
					a	b	c	d	e
Combretum sp.	Loukoura	Rameau Ø < 2 cm	Stock	4	- 1,83		-0,05	0,43	
		Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	4	- 3,71		1,68		- 0,60
		Feuille	Stock	4	- 1,83	0,19			0,36
<i>Deutarium microcarpum</i>	Loukoura	Rameau Ø < 2 cm	Stock	I avec X = D ₁₃₀	0,21	1,18			
		Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	4	- 1,75			0,80	0,56
		Feuille	Stock	4	- 0,49			0,14	0,22
<i>Parkia biglobosa</i>	Loukoura	Rameau Ø < 2 cm	Stock	4	1,32	1,49	2,29		
		Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	I avec X = D ₁₃₀	4,79	2,00			
		Feuille	Stock	4	4,33	1,19		- 2,46	
<i>Terminalia</i> sp.	Loukoura	Rameau Ø < 2 cm	Stock	4	- 8,89	0,89	2,13		
		Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	4	- 5,16		1,01	0,60	
		Feuille	Stock	4	1,15	- 0,12		0,21	
<i>Vitellaria paradoxa</i>	Loukoura	Rameau Ø < 2 cm	Stock	5	1,08	- 0,30	3,12	5,60	
		Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	5	- 10,59	0,25	1,64	- 0,52	
		Feuille	Stock	4	64,82	0,35			0,16
Multispécifique	Loukoura	Rameau Ø < 2 cm	Stock	3	0,20	1,38	0,04		
		Rameau 2 < Ø < 7 cm	Stock	3	0,38	1,74	- 0,40		
		Feuille	Stock	3	0,11	1,70	- 0,38		
<i>Parkia biglobosa</i>	Loukoura	Rameau + feuille	Production	7	0,800	0,020	0,100		
<i>Vitellaria paradoxa</i>	Loukoura	Rameau + feuille	Production	7	- 1,160	1,780	0,040		

* Développement mathématique en tableau 2 avec : D₁₃₀ le diamètre du tronc à 1,30 m (en cm).

La biomasse est très variable entre les compartiments et les territoires (tabl. 4). Les branches épaisses constituent le compartiment le plus important (particulièrement net à Loukoura). La biomasse susceptible d'être la plus disponible (pas de compétition avec d'autres usages actuels ou futurs : branches fines et biomasse des arbrisseaux) était de 1,92 t MS.ha⁻¹ à Loukoura, soit deux fois le volume disponible à Guié. Avec 58 et 23 % de la surface du territoire utilisée pour la culture, la ressource en biomasse la plus disponible était de 1,75 et 8,51 t MS.ha⁻¹ cultivé, respectivement à Guié et Loukoura. À Loukoura, 80 % de la ressource en biomasse est stockée hors des zones cultivées. Ces estimations sont cependant associées à de fortes incertitudes statistiques (fig. 1), résultant entre autres d'une forte hétérogénéité spatiale (CABRAL, 2011).

À titre de comparaison, les quantités de N et P stockées par hectare dans la biomasse raméale à Loukoura représentent respectivement 26 % et 16 % du N et du P stockés par hectare dans la biomasse de mil à la récolte sous climat comparable au Sénégal (MANLAY *et al.*, 2002).

Tableau 4
Ressources raméale et foliaire moyennes des terroirs de Guié et Loukoura.

Biomasse	Compartiments	Guié	Loukoura	Rapport Loukoura/Guié
(t MS.ha ⁻¹ du territoire)				
Branches 2 < Ø < 7 mm	1	0,88	5,26	6,0
Branches Ø < 2 mm	2	0,80	1,86	2,3
Feuilles	3	0,17	1,30	7,7
Arbrisseaux Ø basal tige < 2 mm	4	0,22	0,06	0,3
Totale	1 + 2 + 3 + 4	2,07	8,49	4,1
La plus disponible	2 + 4	1,02	1,92	1,9
(t MS disponible.ha ⁻¹ cultivé)				
La plus disponible	2 + 4	1,75	8,51	4,9
(kg N.ha ⁻¹ du territoire)				
Branches Ø < 2 mm	2		6,38	
Feuilles	3		14,33	
(kg P.ha ⁻¹ du territoire)				
Branches Ø < 2 mm	2		0,93	
Feuilles	3		1,19	

Évolution des biomasses dans les territoires

Si l'on ne considère que les espèces *Vitellaria paradoxa* et *Parkia biglobosa* (fig. 2), la viabilité biophysique simulée de l'utilisation agro-écologique des branches d'arbres à Loukoura dépendait fortement du compartiment considéré, la biomasse raméale totale resterait importante même après 40 ans d'exploitation (- 27 %) tandis que la biomasse la plus disponible chuterait de 59 %.

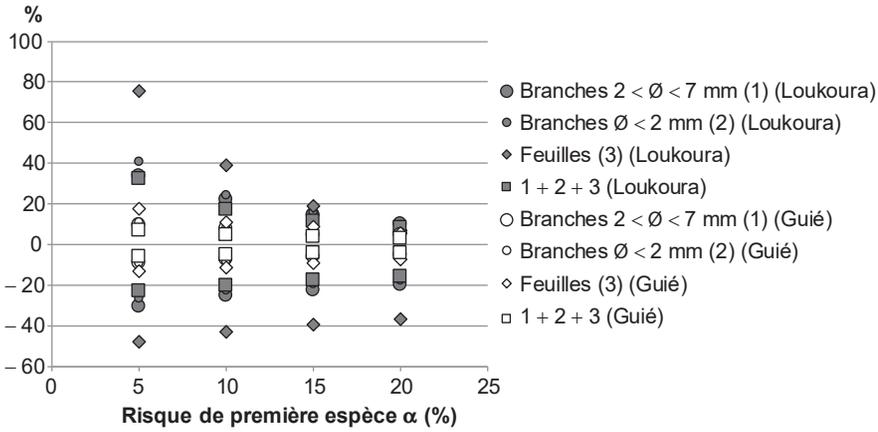


Figure 1
Intervalle de confiance de la moyenne de la biomasse à l'échelle des territoires de Guié et Loukoura exprimés en % de la moyenne.

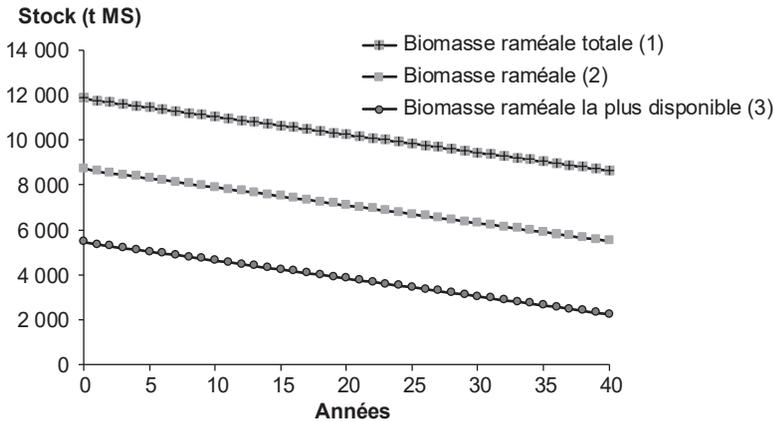


Figure 2
Simulation de l'évolution de la biomasse raméale sur pied de *Vitellaria paradoxa* et *Parkia biglobosa* à Loukoura.
Scénario : densité d'arbres actuelle ; % de la surface cultivée et fertilisée annuellement de 30 % ; apport annuel de bois raméal de $1,5t MS.ha^{-1}$.
(1) Branches $\varnothing \leq 7$ cm + feuilles + arbrisseaux \varnothing basal des tiges < 2 cm ;
(2) Branches $\varnothing \leq 7$ cm ;
(3) Branches $\varnothing \leq 2$ cm + feuilles + arbrisseaux \varnothing basal des tiges < 2 cm.

Discussion

En raison de la diversité des modèles architecturaux des espèces et de la pratique courante de la taille, il n'existe pas de forme de modèle de prédiction de biomasse

qui serait la meilleure quelle que soit l'espèce. Mais les biomasses et productions raméales peuvent être modélisées en fonction de variables dendrométriques mesurables au sol. Ces variables d'entrée sont cependant plus ou moins simples à mesurer en fonction des espèces et des compartiments à estimer.

La biomasse stockée susceptible d'être la plus disponible au niveau des villages est du même ordre de grandeur que l'apport annuel testé dans l'essai de Gampela (1,5 t MS.ha⁻¹). Dans l'état actuel du couvert végétal et considérant l'impact incertain sur la production végétale de la dose basse de bois raméal en station (cf. page 178), la disponibilité de la biomasse stockée avant la mise en place de la taille régulière est donc probablement limitante, ce qui suppose une densification des peuplements ligneux. Une rapide approximation montre qu'en tenant compte de la régénération de la biomasse et dans un scénario bas d'exploitation, le stock de biomasse s'épuiserait assez rapidement (fig. 2). Deux réserves supplémentaires s'imposent : (1) les moyens limités de transport des branches des sources vers les cultures imposent la proximité des arbres avec les cultures cibles, or cette proximité est limitée au moins à Loukoura, et (2) la capacité de reconstitution de la ressource après la première taille et les suivantes doit être évaluée afin de définir des patrons d'exploitation durable des essences locales (intensités spatiale et temporelle de taille). Ces premiers résultats doivent être améliorés (1) en construisant des modèles individuels de production pour davantage d'espèces, (2) en identifiant les modifications écophysologiques induites par l'émondage afin de proposer un modèle d'exploitation durable plus mécaniste, et (3) en développant un simulateur d'évolution temporelle des stocks de biomasse à l'échelle du territoire plus réaliste (individu-centré, spatialisé et incorporant des actions de plantation).

Conclusions

L'amendement du sol avec du bois raméal est théoriquement prometteur, en particulier avec l'augmentation de l'ampleur des stress hydriques qui devrait régionalement accompagner le changement climatique : la stimulation de la biomasse fongique attendue d'un apport accru de lignine dans le système devrait favoriser les champignons par rapport aux bactéries et augmenter la résistance de l'écosystème à la sécheresse (DE VRIES *et al.*, 2012).

Cependant, dans les conditions expérimentales choisies, l'application de BRF ne permet pas de détecter d'amélioration significative systématique des performances (augmentation ou stabilisation de la production) de la culture par rapport au témoin sans apport. Même lorsqu'il y a complémentation par de l'engrais minéral azoté, aucun bénéfice du BRF sur la paille n'a été observé. Aucune tendance générale claire ne ressort concernant l'amélioration des propriétés chimiques du sol par le BRF, ou par le mode d'application (mulch ou enfoui). En revanche l'application

de bois raméal stimule clairement l'activité des termites. Ceci suggère un modèle de fonctionnement du système sol-plante assez différent du modèle agronomique tempéré et donc des aménagements (variables suivies, échelles spatiales couvertes) dans les protocoles d'études inspirés par ce dernier.

Les stocks initiaux (avant mise en routine de la taille) sont importants dans le terroir au climat le plus humide, mais nettement insuffisants dans le terroir à climat sec, et ceci même pour un amendement de faible intensité (1,5 t MS.ha⁻¹.an⁻¹). L'adéquation de la production disponible est difficile à évaluer à ce stade par manque de modèles individuels de production. Quoi qu'il en soit, la densification du parc agroforestier est nécessaire, avec plusieurs contraintes à prendre en compte :

- (1) biophysiques : la proximité aux champs est indispensable, ce qui implique le recours aux haies vives ou au parc sous culture annuelle pour des espèces comme *Vitellaria paradoxa* ou *Faidherbia albida* A. Chev., dont les usages multiples ou la phénologie particulière rendent acceptable la présence dans les champs ;
- (2) légales : au Burkina Faso, comme dans plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest, un plan de gestion est nécessaire pour permettre la récolte de bois vert ;
- (3) foncières : la sécurisation ou la clarification du statut foncier des terres restent à faire pour inciter à la plantation.

Il existe cependant des facteurs favorables à cette densification :

- (1) les synergies pour la fourniture, par l'émondage, de services autres (bois de feu, produits forestiers non ligneux dont le fourrage) que l'amendement du sol, ce qui réduit également le surcoût de travail lié à l'adoption des bois raméaux ;
- (2) la densification, en se basant sur la régénération naturelle assistée et sur une politique forestière réformée, peut être bon marché (REIJ *et al.*, 2009).

De nouvelles recherches sont nécessaires afin de mieux évaluer et éventuellement promouvoir la technique. Il s'agit des perspectives déjà évoquées (évaluation de nouvelles modalités d'apport du bois raméal, sophistication des modèles de production et de simulation d'évolution de la ressource raméale de la parcelle au paysage), mais aussi d'examiner de nouvelles dimensions (juridique, foncière, socio-économique, éco-physiologique) et les interactions avec d'autres intrants (organiques endogènes ou minéraux) et d'autres bénéfiques de la taille.

Bibliographie

ALTIERI M. A., 2002

Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 93 (1-3) : 1-24.

ARDOIN-BARDIN S., MILANO M.,

THIVET G., SERVAT E., 2010

« Water resources and climate change: evolution compared for basins in Mediterranean and West African regions ». In Servat E.,

Demuth S., Dezetter A., Daniell T. (éd.) : *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources*, Wallingford, Int. Assoc. Hydrological Sciences : 521-528.

ASSELINEAU E., DOMENECH G., 2007
De l'arbre au sol. Les bois raméaux fragmentés. Rodez, France, Éditions du Rouergue, 190 p.

BARTHÈS B. G., MANLAY R. J., PORTE O., 2010
Effets de l'apport de bois raméal sur la plante et le sol : une revue des résultats expérimentaux. *Cahiers Agricultures*, 19 (4) : 280-287.

BARTHÈS B. G., PENCHE A., HIEN E., DELEPORTE P., CLERMONT-DAUPHIN C., COURNAC L., MANLAY R. J., 2015
Effect of ramial wood amendment on sorghum production and topsoil quality in a Sudano-Sahelian ecosystem (central Burkina Faso). *Agroforestry Systems*, 89 (1) : 81-93.

CABRAL A.-S., 2011
Quantification de la ressource en bois raméal à l'échelle du terroir d'Iolonoro au Burkina Faso. Thèse de MSc, AgroParisTech, Montpellier, France.

DE VRIES F. T., LIHI M. E., BJORN LUND L., BOWKER M.A., CHRISTENSEN S., SETALA H. M., BARDGETT R. D., 2012
Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. *Nature Climate Change*, 2 (4) : 276-280.

DODELIN B., EYNARD-MACHET R., ATHANAZE P., ANDRÉ J., 2007
Les rémanents en foresterie et agriculture – Les branches : matériau d'avenir. Paris, France, Tec & Doc, Lavoisier, 384 p.

EVANS T. A., DAWES T. Z., WARD P. R., LO N. T., 2011
Ants and termites increase crop yield in a dry climate. *Nature Communications*, 2 (1) : 262.

EVERITT B. S., SKRONDAL A., 2010
The Cambridge Dictionary of Statistics. Cambridge University Press, 478 p.

FAO, 2015
World reference base for soil resources 2015. Rome, Food and Agricultural Organisation, 192 p.

FÉLIX G. F., CLERMONT-DAUPHIN C., HIEN E., GROOT J. C. J., PENCHE A., BARTHÈS B. G., MANLAY R. J., TITTONELL P., COURNAC L., 2018
Ramial wood amendments (*Piliostigma reticulatum*) mitigate degradation of tropical soils but do not replenish nutrient exports. *Land Degradation & Development*, 29 (8) : 2694-2706.

KABRÉ G., 2010
Des rameaux ligneux pour fertiliser les sols de savane : quelle disponibilité de la ressource dans le terroir villageois de Guié au Burkina Faso. Thèse de MSc, École nationale des eaux et forêts, Bobo Dioulasso, 55 p.

KAISER D., LEPAGE M., KONATE S., LINSENMAIR K. E., 2017
Ecosystem services of termites (Blattoidea: Termitoidea) in the traditional soil restoration and cropping system Zai in northern Burkina Faso (West Africa). *Agriculture Ecosystems & Environment*, 236 : 198-211.

LEMIEUX G., 1997
Les fondements pédogénétiques des écosystèmes forestiers : une approche de la métastabilité par la biologie tellurienne. GCBR, université de Laval.

MANDO A., 1997
Effect of termites and mulch on the physical rehabilitation of structurally crusted soils in the Sahel. *Land Degradation and Development*, 8 : 269-278.

MANLAY R. J., CHOTTE J.-L., MASSE D., LAURENT J.-Y., FELLER C., 2002
Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna III. Plant and soil components under continuous cultivation. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 88 (3) : 249-269.

MANLAY R. J., MASSE D., CHEVALLIER T., RUSSELL-SMITH A., FRIOT D., FELLER C., 2004
Post-fallow decomposition of woody roots in the West African savanna. *Plant and Soil*, 260 (1-2) : 123-136.

PANSU M., GAUTHEYROU J., 2006
Handbook of Soil Analysis. The Netherlands, Springer, 993 p.

PERRY D. A., AMARANTHUS M. P., BORCHERS J. G., BORCHERS S. L., BRAINERD R. E., 1989
Bootstrapping in ecosystems. *Bioscience*, 39 (4) : 230-237.

**PIŠKUR B., HUMAR M., ULČNIK A.,
JURC D., POHLEVEN F., 2013**

« Fungal wood decay processes as a basis for bioremediation ». In Goltapeh E.M., Danesh Y.R., Varma A. (éd.) : *Fungi as bioremediators*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg : 51-74.

REIJ C., TAPPAN G., SMALE M., 2009

Agroenvironmental transformation in the Sahel. Another kind of "Green revolution". *IFPRI Discussion Paper*, IFPRI, 52 p.

**ROULAND C., LEPAGE M., CHOTTE J.-L.,
DIOUF M., NDIAYE D., NDIAYE S., SEUGE C.,
BRAUMAN A., 2003**

Experimental manipulation of termites

(*Isoptera*, Macrotermitinae) foraging patterns in a Sahelo-Sudanese savanna: effect of litter quality. *Insectes Sociaux*, 50 (4) : 309-316.

**SOUMARE M. D., MNKENI P. N. S.,
KHOUMA M., 2002**

Effects of *Casuarina equisetifolia* composted litter and ramial-wood chips on tomato growth and soil properties in Niayes, Senegal. *Biological Agriculture & Horticulture*, 20 : 111-123.

WEZEL A., BOCKER R., 1999

Mulching with branches of an indigenous shrub (*Guiera senegalensis*) and yield of millet in semi-arid Niger. *Soil & Tillage Research*, 50 (3-4) : 341-344.

