

L'intégration agriculture-élevage améliore-t-elle l'efficacité, le recyclage et l'autonomie énergétique brute des exploitations familiales mixtes au Burkina Faso ?

Ouèbounga Ida Bénagabou^{1, 2, 3, 4 *} Mélanie Blanchard^{1, 2, 3}
Valérie M.C. Bougouma/Yaméogo⁴ Jonathan Vayssières^{2, 3}
Mathieu Vigne^{2, 3} Eric Vall^{2, 3} Philippe Lecomte^{2, 3}
Hassan Bismarck Nacro⁴

Mots-clés

Polyculture élevage, recyclage, matières organiques, plante fourragère, résidu de récolte, agroécologie, efficacité, Burkina Faso

Submitted: 28 September 2016

Accepted: 30 October 2017

Published: 11 December 2017

DOI: 10.19182/remvt.31479

Résumé

Face au défi majeur de la croissance démographique mondiale, le secteur agricole se doit de concilier une augmentation de la production alimentaire et une diminution de son impact environnemental. L'intégration agriculture-élevage (IAE) mise en œuvre dans les exploitations familiales mixtes à faible niveau d'intrants peut être un moyen d'y parvenir. L'un des grands principes de l'IAE est l'utilisation de ressources produites par les différents ateliers de l'exploitation pour la conduite des autres ateliers. L'IAE se construit autour de trois grandes pratiques : la traction animale, le stockage de fourrage et la production de fumure organique. L'objectif de cette étude a été d'analyser l'effet de ces pratiques sur l'autonomie, le recyclage et l'efficacité énergétique des exploitations familiales mixtes. Pour ce faire, les flux d'énergie brute de huit exploitations familiales mixtes de la zone cotonnière de l'ouest du Burkina Faso, suivies sur une période de 20 mois, ont été analysés grâce à la méthode d'analyse de réseau écologique (*ecological network analysis* [ENA]). Les résultats ont montré que le stockage de fourrage et la production de fumure organique ont permis aux exploitations d'augmenter leur recyclage et leur autonomie, et d'acquiescer une meilleure efficacité énergétique. La méthode ENA met en lumière les caractéristiques et les performances d'exploitations de différents types (agriculteurs, éleveurs, agroéleveurs) et évalue l'apport des pratiques de l'IAE sur ces performances. Il apparaît cependant qu'il existe des marges de manœuvre sur le niveau de mise en œuvre des pratiques d'IAE dans les exploitations familiales mixtes de la zone cotonnière de l'ouest du Burkina Faso permettant d'améliorer le recyclage de l'énergie.

■ Pour citer cet article : Bénagabou O.I., Blanchard M., Bougouma/Yaméogo V.M.C., Vayssières J., Vigne M., Vall E., Lecomte P., Nacro H.B., 2017. Does crop-livestock integration improve energy-use efficiency, recycling and self-sufficiency of smallholder farming systems in Burkina Faso? *Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop.*, 70 (2) : 31-41, doi: 10.19182/remvt.31479

■ INTRODUCTION

L'augmentation attendue de la population mondiale à 9,6 milliards d'habitants d'ici 2050 se fera principalement en Afrique où la population devrait doubler sur ce pas de temps, passant ainsi de 1 milliard en 2015 à 2,1 milliards en 2050 (Nations unies, 2014). Afin de satisfaire les besoins alimentaires de la population croissante, de plus en plus urbaine et au régime alimentaire changeant, une augmentation des productions agricoles est nécessaire (Rae et al., 2010). La stagnation des rendements des systèmes agricoles des pays industrialisés construits sur un modèle productiviste à forte utilisation d'intrants agricoles (semences, énergies, engrais, herbicides, etc. ; Dorin et al., 2010) et la faible disponibilité pour étendre les terres agricoles dans

1. CIRDES-URPAN, 01 BP 454 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso.

2. CIRAD, UMR SELMET, F-34398 Montpellier, France.

3. SELMET, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France.

4. UPB, IDR, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

* Auteur pour la correspondance

Tél. : +226 70 00 15 61 ; email : idadec@yahoo.fr



ces zones invitent à saisir les opportunités existantes dans les zones moins peuplées pour un essor de leur production et leur contribution grandissante à la demande alimentaire mondiale (Sims, 2011).

En Afrique, les systèmes de production agricoles sont mis en œuvre par des exploitations familiales mixtes (Herrero et al., 2010), caractérisées par une utilisation limitée d'intrants agricoles et une faible productivité dues aux faibles revenus et pouvoirs d'achat des producteurs, et aux difficultés d'accès aux intrants (Traoré et al., 2013). Ces exploitations familiales mixtes mettent ainsi en œuvre l'intégration agriculture-élevage (IAE) constituant une alternative pour améliorer durablement leur productivité (Herrero et al., 2010). L'IAE repose sur trois piliers biotechniques permettant le recyclage de la biomasse et de l'énergie entre le système agricole et le système d'élevage : a) la traction (énergie) animale pour le système de culture, b) le transfert des fourrages (résidus de cultures, cultures fourragères) pour l'alimentation des animaux, et c) la production de fumure organique issue des déjections animales et du recyclage des résidus de culture à destination du système de culture (Landais et Lhoste, 1990 ; Smith et al., 1997).

La biomasse est une source d'énergie brute renouvelable commune aux exploitations familiales mixtes mais aussi un de ses facteurs limitants (alimentation animale, gestion de la matière organique des sols, production agricole). Le recyclage et l'autonomie en biomasse sont considérés comme une propriété essentielle pour assurer la durabilité des écosystèmes (Allesina et Ulanowicz, 2004). L'autonomie, le recyclage, et l'efficacité énergétique et minérale des exploitations familiales mixtes ont fait l'objet d'analyses à travers des évaluations de consommations d'énergie fossile et brute (Bénagabou et al., 2013 ; Vigne, 2012), et du recyclage et de l'autonomie en azote (Stark, 2016 ; Alvarez et al., 2014 ; Blanchard et al., 2013 ; Rufino et al., 2009b). Nous proposons dans cette étude de mobiliser la méthode ENA pour mesurer l'effet des pratiques d'IAE sur le fonctionnement et certaines performances des exploitations familiales mixtes (efficacité, recyclage et autonomie de l'énergie brute), en posant l'hypothèse que ces pratiques participent à une gestion durable des ressources des agroécosystèmes. Cette démarche nous permet d'identifier des pratiques améliorant les performances des exploitations.

Pour évaluer l'autonomie, le recyclage et l'efficacité énergétique, la méthode d'analyse de réseau écologique (*ecological network analysis* [ENA]) ; Alvarez et al., 2014 ; Dalsgaard et Oficial, 1997 ; Rufino et al., 2009a ; Stark, 2016) a été appliquée au réseau de flux d'énergie brute des agroécosystèmes étudiés. Cette méthode empruntée à l'économie, où elle a permis d'estimer la quantité de ressources nécessaire à la production d'une quantité de biens, mobilise le cadre d'analyse *input-output* (Leontief, 1951). Elle a été introduite en écologie par Hannon (1973) pour quantifier les relations dans les écosystèmes (Fath et Patten, 1999 ; Ulanowicz, 2001), et dans les agroécosystèmes pour analyser les relations entre les compartiments ou activités des exploitations agricoles (Dalsgaard et Oficial, 1997 ; Rufino et al., 2009a ; Stark, 2016).

Nous proposons dans cet article de mobiliser cette méthode pour évaluer l'effet des pratiques d'IAE sur l'efficacité, le recyclage et l'autonomie en énergie brute des exploitations familiales mixtes de l'ouest du Burkina Faso. Après avoir évalué l'effet de la structure de ces exploitations sur l'efficacité, le recyclage et l'autonomie des exploitations étudiées nous avons analysé l'effet des pratiques d'IAE sur ces différents paramètres.

■ MATERIEL ET METHODES

Site d'étude et exploitations familiales mixtes

L'étude a été conduite dans le village de Koumbia (province du Tuy), situé dans la zone cotonnière à l'ouest du Burkina Faso (latitude 12° 42' 207'' N, longitude 4° 24' 10'' O). Le climat y est soudano-guinéen avec une saison des pluies de mai à octobre (1000 mm/an), une saison sèche froide d'octobre à février, et une saison sèche chaude de

mars à avril. Les fortes densités humaines et animales, respectivement 55 habitants.km⁻² et 48 unités bovin tropical (UBT).km⁻², et l'importante emprise agricole (53 % du territoire) engendrent des compétitions fortes pour l'accès aux ressources, aboutissant à des conflits courants entre les usagers (Vall et al., 2006 ; Vall et Diallo, 2009).

Une typologie des exploitations familiales mixtes de la zone comprenant trois types a été proposée précédemment (Vall et al., 2006 ; 2012) : a) les agriculteurs, principalement orientés vers les productions agricoles avec du coton et des céréales destinés à la vente et à l'autoconsommation, et possédant un élevage d'animaux de trait (< 10 bovins) ; b) les éleveurs, orientés vers les productions animales avec des troupeaux de bovins (> 10 à plus de 110 bovins) et cultivant de petites surfaces agricoles (< 7,5 ha) ; et c) les agroéleveurs développant les deux activités avec des troupeaux d'élevage (> 10 bovins) et de grandes surfaces cultivées (> 7,5 à plus de 35 ha), grâce à une main-d'œuvre familiale importante et combinant parfois traction animale et motorisation (> 40 ha).

Huit exploitations représentatives de la diversité des pratiques d'IAE ont été sélectionnées pour cette étude : trois agriculteurs, deux agroéleveurs et trois éleveurs. Le choix du village et des exploitations s'est basé sur l'existence de données et d'une expertise sur les pratiques d'IAE et les flux de biomasses (Bénagabou et al., 2013 ; Dugué et al., 2013 ; Vall et Diallo, 2009 ; Vall et al., 2006 ; 2012), et sur leur récente implication dans les projets de recherche d'action en partenariat garantissant l'implication des producteurs et la fiabilité des données collectées (Vall et al., 2016).

Le choix de la méthode d'étude de cas basée sur un petit échantillon d'exploitations diversifiées s'explique par les contraintes temporelles et humaines du suivi mensuel des flux de biomasse et des pratiques d'IAE. La méthode ENA appliquée à l'analyse des agroécosystèmes nécessite en effet des données détaillées sur l'ensemble des flux entre les compartiments des agroécosystèmes (Alvarez et al., 2014 ; Dalsgaard et Oficial, 1997 ; Rufino et al., 2009a ; Stark, 2016). Cette approche trouve son intérêt dans la compréhension fine des pratiques individuelles (Dalsgaard et Oficial, 1997).

Méthode d'analyse de réseau écologique

Le réseau de flux a été analysé par la méthode d'analyse de réseau écologique (ENA) qui se base sur l'analyse des flux entrants (*inflows*), des flux sortants (*outflows*) et des flux internes (*internalflows*) de systèmes complexes. L'application de la méthode ENA au réseau de flux des exploitations familiales mixtes passe par deux grandes étapes : a) la conceptualisation qui consiste à délimiter les frontières de l'exploitation, diviser le système en compartiments, identifier les flux reliant les compartiments entre eux et avec le milieu extérieur, et réaliser le diagramme de flux ; et b) la modélisation du réseau de flux comprenant la sélection de l'élément fondamental auquel s'intéresse l'étude (énergie brute ici), la quantification des flux et des variations de stock, et la construction de la matrice des flux.

Modèle conceptuel des exploitations familiales mixtes

Les huit exploitations familiales mixtes ont été conceptualisées comme des systèmes composés de six compartiments : les champs, le troupeau, la famille, le grenier et le hangar pour le stockage des produits agricoles et des fourrages, et les lieux de production de fumure organique. Ce modèle conceptuel a été établi à dire d'expert en tenant compte des caractéristiques des exploitations familiales mixtes de la zone d'étude (autoconsommation, conduite des animaux sur parcours non gérés ; Vall et al., 2006 ; Vall et Diallo, 2009). La conceptualisation du système a abouti à la définition de 30 flux d'énergie brute (8 flux entrants, 9 flux sortants, 13 flux internes ; figure 1). La conceptualisation est une étape importante lors de l'application de la méthode ENA en définissant l'exhaustivité des flux à quantifier.

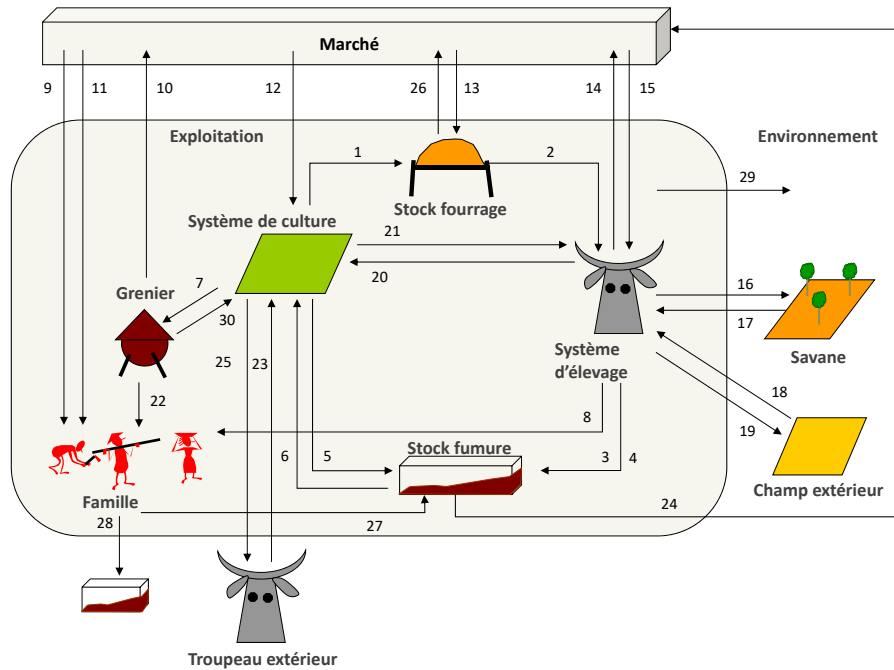


Figure 1 : modèle conceptuel des flux d'énergie brute d'une exploitation familiale mixte dans l'ouest du Burkina Faso.

1. Stockage des résidus de cultures ; 2. Distribution d'aliments et fourrage aux animaux ; 3. Déjections animales ; 4. Refus de fourrage par les animaux ; 5. Biomasse végétale vers les fosses ; 6. Épandage de la fumure organique ; 7. Stockage des productions agricoles ; 8. Productions animales autoconsommées ; 9. Achat de productions alimentaires ; 10. Vente de productions agricoles ; 11. Achat de produits non alimentaires (ex. bois) ; 12. Achat d'intrants agricoles (fumure, engrais et produits phytosanitaires) ; 13. Achat pour l'alimentation des animaux ; 14. Vente de produits animaux ; 15. Achat d'animaux ; 16. Dépôt de déjections animales sur les parcours par le troupeau ; 17. Consommation de fourrages sur les parcours par le troupeau ; 18. Consommation des résidus sur les champs extérieurs par le troupeau ; 19. Dépôt des déjections animales sur les champs extérieurs par le troupeau ; 20. Dépôt des déjections animales sur les champs par le troupeau ; 21. Consommation des résidus sur les champs par le troupeau ; 22. Consommation des productions agricoles par la famille ; 23. Dépôt des déjections animales par des troupeaux extérieurs sur les champs ; 24. Vente de fumure organique ; 25. Prélèvements de résidus de culture des champs par des troupeaux extérieurs ; 26. Vente des résidus de culture ; 27. Ordures ménagères produites par la famille ; 28. Dépôts des fèces et urines de la famille dans les latrines ; 29. Animaux morts et volés ; 30. Prélèvement de productions agricoles comme semences

Collecte des données

Un livret de suivi a été élaboré pour chacune des huit exploitations et s'articulait autour de sept rubriques : les caractéristiques structurelles des fermes et la composition des ménages, le système d'élevage, le système de cultures, la gestion des stocks de produits agricoles et de sous-produits, et la production de fumure organique. Ces livrets ont permis de collecter les données pour quantifier les 30 flux de biomasse identifiés dans la figure 1. Le suivi a été réalisé sur 20 mois (mai 2013 à décembre 2014) car certains flux (3, 4, 6 et 22) correspondaient à des activités s'étendant sur plus d'une année agricole (18 mois).

Certains flux ont été déclarés mensuellement par les chefs d'exploitation. C'était le cas : a) de l'achat de produits alimentaires (flux 9), d'intrants agricoles (flux 12), d'aliments pour animaux (flux 13), d'animaux (flux 15) ; b) de la vente de produits agricoles et d'animaux (flux 10 et 14), de fumure organique (flux 24), de résidus de culture (flux 26), du vol ou de la mort d'animaux (flux 29) ; et c) de l'autoconsommation des animaux et des produits animaux (flux 8 et 22), des semences (flux 30), de la biomasse végétale pour remplir les fosses (flux 5).

D'autres flux ont été mesurés dans les exploitations au moment de leur mise en œuvre. C'est le cas du stockage (flux 1), de la distribution des fourrages (flux 2), de la production de déjections animales (flux 3), du refus de fourrage (flux 4), de l'épandage de fumure organique (flux 6), du stockage des produits agricoles (flux 7) et des produits non alimentaires comme le bois consommé par la famille (flux 11), et des ordures ménagères produites par la famille (flux 27).

Les quantités de biomasse manipulées pour ces activités ont été pesées avec des pesons adaptés (5 à 200 kg) selon une fréquence variable (soit trois jours par mois pour les flux 2, 3, 4 et 11, soit un à cinq jours par an pour les flux 1, 6 et 7), en fonction du besoin de renseignement du flux. Ainsi, la mesure de la distribution des fourrages (flux 2) a consisté au nettoyage de l'étable le matin avant la distribution du fourrage. Les animaux constitués en lots recevaient le fourrage pesé. Le lendemain, les déjections animales (flux 3) étaient ramassées, séparées des refus d'affouragement (flux 4) par lot, pesées et mises en tas. L'évaluation de la teneur en matière sèche des biomasses a été réalisée sur les fourrages, les déjections animales et les refus.

Enfin, les autres flux, comme la quantité de fourrage ingérée sur les parcours (flux 17, 18, 21 et 25) et la quantité de déjection déposée sur les parcours (flux 16, 19, 23 et 20) ou dans les latrines (flux 28), ont pu être estimés à partir de données de littérature. Pour estimer l'ingestion des animaux sur les différents milieux, nous avons tenu compte de la capacité d'ingestion des animaux, des quantités de fourrage distribuées à la concession et des différents lieux de pâtures des animaux (champs internes et externes, respectivement pour la vaine pâture interne et externe et les parcours naturels). Les quantités de déjections animales déposées par les animaux sur les différents milieux (champs internes et externes, ou parcours naturels) ont été estimées selon le nombre d'UBT et leur temps de présence sur ces différents milieux, à partir du niveau d'ingestion sur ces milieux, de la quantité moyenne de fèces et d'urine produite par UBT et par jour, et du niveau d'ingestion moyen par UBT et par jour. Les déjections des animaux en stabulation dans les parcs de nuit ont été estimées, selon les catégories animales, à partir du temps de stabulation des animaux et de la capacité d'excrétion (fèces et urine) journalière.

Quelques hypothèses ont été formulées. La fumure organique est produite à partir de matières premières issues de la campagne agricole précédente (n-1 ; flux 3 et 4) et est utilisée pendant la campagne agricole suivante (n+1 ; flux 6). Ne disposant pas de données sur la production de résidus de culture et de déjections animales sur la campagne précédant le suivi, nous avons émis l'hypothèse que les pratiques et les niveaux de production et d'utilisation de fumure organique étaient similaires d'une année à l'autre. La même hypothèse a été retenue pour estimer la consommation par la famille de produits agricoles issus du grenier (flux 22). Ces hypothèses ont été validées auprès des huit exploitations étudiées en 2013 (Bénagabou et al., 2013).

Indicateurs de structure, de fonctionnement et de performance des réseaux de flux d'énergie brute issus de la méthode ENA

Parmi les indicateurs proposés par la méthode ENA, sept ont été sélectionnés pour analyser la structure, le fonctionnement et la performance des exploitations familiales mixtes de la zone d'étude (Finn, 1980 ; Stark, 2016) : a) un indicateur de structure (la densité des liens), b) les indicateurs de fonctionnement (flux totaux du système ou *total system throughflows* ; *path length* ; *internal cycling rate* ; *Finn cycling index*), et c) les indicateurs de performance (dépendance ; efficacité d'énergie brute) (tableau I).

Indicateurs de structure des exploitations familiales mixtes et de pratiques d'intégration agriculture-élevage

L'indicateur de structure des exploitations familiales mixtes choisi est le chargement animal des exploitations exprimé en nombre d'UBT par hectare de surface cultivée. Il renseigne le potentiel d'IAE au sein des exploitations familiales mixtes. En effet, une exploitation spécialisée dans l'agriculture ayant un chargement animal faible bénéficiera peu des bénéfices réciproques entre les activités de cultures et d'élevage.

Trois indicateurs décrivant les pratiques d'IAE ont été calculés : a) la quantité de résidus de culture et de fourrage (autoproduits et importés) stockés, rapportée à la taille du troupeau (en kg matière sèche [MS].UBT⁻¹.an⁻¹) ; b) la production annuelle de fumure organique, rapportée à la surface cultivée (en kg MS.ha⁻¹.an⁻¹), traduisant une IAE passive, n'impliquant pas de travail ni de transport de biomasses ; et c) les efforts de production de fumure organique à travers la production de fumure organique rapportée à la taille du cheptel (en kg MS.UBT⁻¹.an⁻¹), traduisant une IAE active impliquant la manutention et le transport de biomasse.

Le niveau de performance de ces pratiques est estimé à travers la couverture des besoins alimentaires des animaux permis par le stockage de

Tableau I

Indicateurs utilisés dans l'analyse de réseau des flux d'énergie brute dans des agroécosystèmes familiaux de l'ouest du Burkina Faso et leur calcul

Indicateurs	Définitions et modes de calcul	Interprétations
Indicateur de structure		
Densité des liens (Li/n)	Rapport entre le nombre de flux (Li) et le nombre de compartiments (n) dans le système	Evaluation de la diversité/complexité du système
Indicateurs de fonctionnement		
Flux totaux du système (TST)	Somme de tous les flux traversant les compartiments du système	Mesure l'activité totale du système
<i>Path length</i> (PL)	Rapport entre TST et TIN	Evaluation de l'intensité du recyclage du système Nombre moyen de compartiments traversés par une unité de flux entrant entre son entrée dans le système et sa sortie
<i>Internal cycling rate</i> (ICR)	Rapport entre la somme des flux internes (TT) et le TST	Part de l'activité créée par les flux internes entre les compartiments
<i>Finn cycling index</i> (FCI)	Rapport entre TSTc et TST 0 < FCI < 1 avec 0 pas de recyclage et 1 recyclage total	Efficacité de recyclage de tous les compartiments Probabilité qu'une fraction de flux d'un compartiment y retourne directement ou indirectement
Indicateurs de performance		
Autonomie	Rapport entre IN et TST	Evaluation du degré d'autonomie (A) du système A = 1 - D
Efficacité d'énergie brute	Rapport entre flux sortants et entrants	Evaluation de la performance énergétique du système

IN : somme des flux entrants du système étudié ; TIN : somme des importations (IN) de chaque compartiment et des variations de stock des compartiments ; TT : somme des flux internes ; TSTc : cycle des flux totaux du système

fouillage (en pourcentage de 6,5 kg MS.jour⁻¹.UBT⁻¹) (Boudet, 1984) et la couverture des besoins en fumure organique des sols (en pourcentage de 2,5 t MS.ha⁻¹.an⁻¹) (Berger et al., 1987). La traction animale, troisième pilier de l'IAE, traite de l'énergie musculaire dépensée pour fournir du travail, différente de l'énergie brute concernée par cette étude ; elle n'a pas été abordée. Des analyses de corrélations entre les différentes variables ont été faites avec le logiciel XL STAT version 18.07.

■ RESULTATS

Diversité de pratiques d'intégration agriculture-élevage

Stockage de résidus de culture selon les types d'exploitation

Les quantités de fourrage stockées par les exploitations rapportées à la taille du troupeau ont varié de 0 à 929 kg MS.UBT⁻¹.an⁻¹ couvrant 0 à 41 % des besoins fourragers des animaux (tableau II). Les pailles de céréales (maïs, sorgho, riz) constituaient le principal stock de fourrage dans les exploitations, suivies des fanes de légumineuses (arachide, niébé), des cultures fourragères (mucuna) et du foin, en faible proportion chez un éleveur qui diversifiait le fourrage stocké.

Les éleveurs avaient les plus faibles quantités de fourrages stockés par unité de bétail (0 à 129 kg MS.UBT⁻¹.an⁻¹) leur permettant de couvrir seulement 0 à 6 % des besoins de leurs animaux. Les fourrages stockés (résidus de culture, pour certains du foin et pour d'autres des cultures fourragères comme le mucuna) étaient distribués à des animaux gardés à la ferme pour des raisons sanitaires, pour l'embouche, dans l'attente d'un vêlage, en période de lactation ou de production laitière. Un des éleveurs (E4) a fourni un effort particulier de stockage de fourrage (plus de 8 t MS stockées) pour répondre à ses objectifs de production laitière, couvrant seulement en moyenne 6 % des besoins de son grand troupeau.

Les agroéleveurs et les agriculteurs présentaient de plus grandes quantités de fourrages stockés par unité de bétail (175 à 929 kg MS.UBT⁻¹.an⁻¹) leur permettant de couvrir entre 8 et 41 % des besoins de leurs animaux. Ces exploitations stockaient principalement des résidus de culture, cultivaient peu de fourrage et ne fauchaient pas de foin de parcours. Les efforts de stockage restaient plus réduits que chez les éleveurs (entre 0,9 et 3,2 t MS stockées). Les fourrages étaient distribués à l'ensemble des animaux pour suppléer le manque de fourrage en saison sèche. Parmi les exploitations d'agroéleveurs et

Tableau II

Caractéristiques structurelles, indicateurs d'analyse de réseau écologique et d'intégration agriculture-élevage dans des exploitations familiales de l'ouest du Burkina Faso

Variables	Unité	Éleveurs			Agriculteurs			Agroéleveurs	
		E1	E4	E8	A2	A3	A7	AE5	AE6
Caractéristiques structurelles									
Surface totale cultivée	ha	4,2	7,5	1,8	3,0	4,0	6,6	9,0	14,2
Part assolement en coton	%	0	0	0	0	50	42	0	39
Part assolement en céréales	%	72	80	100	67	50	38	72	59
Part assolement en légumineuses	%	28	20	0	33	0	6	17	2
Taille du troupeau	UBT	30,2	64,1	43,5	5,6	3,6	3,5	16,1	10
Chargement animal	UBT/ha	7,2	8,6	24,1	1,9	0,9	0,5	1,8	0,7
Indicateurs d'analyse de réseau écologique									
Li/n	s.u.	1,8	1,8	1,6	2,2	2,2	2,0	2,2	2,2
TST	kMJ	1 557	3 519	2 138	416	432	578	1 229	1 230
PL		1,6	1,9	1,4	1,8	3,0	2,7	2,4	2,7
ICR	%	38	48	27	43	67	63	58	63
FCI	%	16	21	6	20	58	13	22	24
Autonomie	%	27	32	22	37	73	71	59	66
Efficacité d'énergie brute	s.u.	0,25	0,25	0,28	0,19	0,95	1,34	0,26	0,73
Indicateurs d'intégration agriculture-élevage									
Couverture besoin fourrager	%	3	6	0	8	16	41	9	14
Fouillage stocké par UBT	kg MS.UBT ⁻¹	66	129	0	175	370	929	202	308
Foin fauché	%	0	7	0	0	0	0	0	0
Pailles	%	63	85	0	92	88	88	98	89
Fanes et culture fourragère	%	37	8	0	8	12	12	2	11
Couverture besoin en FO	%	50	42	56	24	29	9	32	16
FO/ha	kg MS.ha ⁻¹	1 250	1 062	1 393	600	731	227	812	401
FO/UBT	kg MS.UBT ⁻¹	174	124	58	321	813	429	454	570
Terre de parc	%	81	63	100	0	0	0	16	0
Fumier	%	4	37	0	100	100	100	84	100
Biodigesteur	%	15	0	0	0	0	0	0	0

Li/n : densité des liens ; TST : flux totaux du système ; PL : path length ; ICR : internal cycling rate ; FCI : Finn cycling index
FO : fumure organique ; MS : matière sèche ; UBT : unité de bétail tropical

d'agriculteurs, ceux qui présentaient un chargement animal supérieur à un avaient les taux de couverture des besoins des animaux les plus faibles (de 8 à 9 %).

Production de fumure organique selon le type d'exploitation

L'ensemble des exploitations étudiées étaient propriétaires d'animaux d'élevage et produisaient de la fumure organique. Les quantités de fumure organique produites par les exploitations étaient variables (1,4 à 7,9 t MS) couvrant entre 9 et 56 % des besoins des sols en fumure organique, et les quantités collectées par les exploitations familiales mixtes variaient entre 58 et 813 kg MS.UBT⁻¹.

Trois sources de production étaient possibles : les fosses fumières, les parcs à bétail et un biodigester dans une exploitation. Les éleveurs apportaient les doses les plus élevées de fumure organique à l'hectare (1062 et 1393 kg MS.ha⁻¹), principalement « de manière passive » à travers le parage direct des troupeaux sur leur champ. Toutefois, certains éleveurs diversifiaient la production de la fumure organique à travers une production « active » (fumier de fosse et biodigester). Un chargement animal élevé a facilité la couverture des besoins en fumure organique des sols, même avec un faible effort de production de fumure organique par unité de bétail (58 à 174 kg MS.UBT⁻¹).

Les agriculteurs et agroéleveurs apportaient des doses moyennes à réduites de fumure organique à l'hectare (227 à 812 kg MS.ha⁻¹), même s'ils pouvaient consentir des efforts importants pour produire de la fumure organique par unité de bétail (321 à 813 kg MS.UBT⁻¹). Le faible effectif d'animaux incitait ces exploitations à fournir des efforts pour collecter les refus de fourrage, valoriser les ordures ménagères, transformer des résidus de culture en plus d'une collecte plus minutieuse des déjections animales disponibles.

Effet de la structure des exploitations et des pratiques d'intégration agriculture-élevage sur le réseau de flux d'énergie brute

Effet sur la structure du réseau de flux d'énergie brute

La valeur 2,2 est la densité des liens (Li/n) maximale dans cette étude au vu du nombre de compartiments et de flux internes possibles dans le réseau. Une Li/n inférieure à 2,2 soulignait l'absence de certains flux entre compartiments et indiquait une complexité plus faible des exploitations. Elle a varié de 1,6 à 2,2 pour l'ensemble des exploitations et a été plus faible chez les éleveurs que chez les agroéleveurs et les agriculteurs (tableau II). Li/n était négativement corrélée à la taille du troupeau ($p < 0,05$) et au chargement animal ($p < 0,01$). Les éleveurs avaient tendance à abandonner certains flux, rendant leurs réseaux de flux moins complexes. Ils n'ont pas utilisé de semences provenant du grenier (flux 30) ni de résidus pour la production de fumure (flux 5). L'éleveur E8, à la Li/n la plus faible, n'a pas mobilisé le compartiment « stock de fourrage » sans stock de résidus de culture (flux 1) ni de distribution de fourrage (flux 2). Li/n était positivement corrélée à la production de fumure organique par unité de bétail ($p < 0,05$). La production de fumure organique complexifiait le système de production car elle s'appuyait sur une multiplicité de sources de biomasse impliquant des flux : ramassage des ordures ménagères (flux 27), collecte des déjections animales (flux 3), des refus de fourrage (flux 4) et des résidus de culture (flux 5), épandage de fumure au champ (flux 6). De plus, pour produire de la fumure organique, les exploitations pratiquaient l'affouragement des animaux stabulés (fourrage stocké flux 1 et distribué flux 2). Il n'y avait pas de corrélation entre le stockage de résidus de culture et la densité des liens.

Effet sur le fonctionnement du réseau de flux d'énergie brute

L'activité du réseau (*total system throughflows*, TST) a varié de 416 348 à 3 518 540 MJ. Elle était plus faible chez les agriculteurs, intermédiaire chez les agroéleveurs et plus élevée chez les éleveurs.

Elle était positivement liée à la taille du troupeau ($p < 0,0001$). En effet, les grands troupeaux se nourrissaient principalement à partir de ressources prélevées sur les parcours et les champs extérieurs, réalisant ainsi de fortes importations d'énergie brute dans le réseau et augmentant d'autant l'activité du réseau.

L'intensité de recyclage (*path length* ; PL) a varié de 1,4 à 3 pour l'ensemble des exploitations. Elle était plus faible chez les éleveurs que chez les agriculteurs et les agroéleveurs. Elle était négativement corrélée au chargement animal ($p < 0,05$). La plus faible intensité de recyclage chez les éleveurs s'expliquait par une faible circulation de l'énergie brute à travers le réseau lors de la vaine pâture des résidus de culture par les animaux de l'exploitation et le parage direct sans stockage préalable de fourrage et/ou de fumure organique. De même, une faible productivité des systèmes de culture chez certains agroéleveurs et agriculteurs a engendré une intensité de recyclage faible, suite à des importations de produits alimentaires sans stockage dans le grenier, et à un faible stockage de fourrage et de fumure organique lié à la faible production de résidus de culture.

L'*internal recycling rate* (ICR) représente la part de l'activité du réseau créée par les flux internes du système. Il a varié de 27 à 67 %. Il était plus faible chez les éleveurs que chez les agriculteurs et les agroéleveurs, et négativement corrélé au chargement animal ($p < 0,05$). Chez les éleveurs, l'activité du réseau s'est appuyée sur de fortes importations pour l'alimentation des animaux sur les parcours et les champs extérieurs avec 51 % de l'énergie brute contenue dans le réseau des éleveurs représenté par leurs importations et une faible quantité d'énergie échangée.

L'efficacité de recyclage du réseau (*Finn cycling index*, FCI) a varié de 6 à 58 % et n'était pas significativement différente selon le type d'exploitation, ni corrélée à la taille du troupeau, à la surface totale cultivée et au chargement animal. Les pratiques IAE expliquent également les différences d'intensité de recyclage, de taux de recyclage interne et d'efficacité de recyclage entre les exploitations.

La production de fumure organique par unité de bétail était positivement corrélée à l'intensité de recyclage ($p < 0,01$) et au taux de recyclage interne ($p < 0,01$). La forte production de fumure organique par unité de bétail s'est appuyée sur une diversité de modes de production de fumure organique, avec une réutilisation des biomasses présentes dans les exploitations impliquant la circulation d'énergie brute entre les compartiments du système (flux internes) : ramassage des déjections animales (flux 3), collecte des refus de fourrage (flux 4), ramassage des ordures ménagères (flux 27) et compostage des résidus de culture (flux 5).

La production de fumure organique par hectare était négativement corrélée à l'intensité de recyclage ($p < 0,05$) et au taux de recyclage interne ($p < 0,05$). Aucune corrélation n'a été observée avec l'efficacité de recyclage (figure 2). La production de fumure organique par hectare était fortement liée aux importations d'énergie brute ($p < 0,05$) à travers le prélèvement par les animaux sur les parcours et les champs extérieurs, avec une circulation réduite de l'énergie entre les compartiments.

Le stockage de résidus de culture par unité de bétail a semblé améliorer le taux de recyclage interne et l'efficacité de recyclage de l'énergie brute dans les exploitations familiales mixtes jusqu'à un seuil au-delà duquel ils ont diminué (figure 3). Le stockage de résidus de culture (flux 1) a engendré une propagation d'énergie brute entre les compartiments de l'exploitation à travers plusieurs flux internes : distribution de fourrage (flux 2), collecte de déjections animales (flux 3) et de refus de fourrage (flux 4), épandage de fumure sur les champs (flux 6). Ces flux n'existaient pas dans les systèmes où l'alimentation était assurée principalement par la vaine pâture (flux 21, sans stockage).

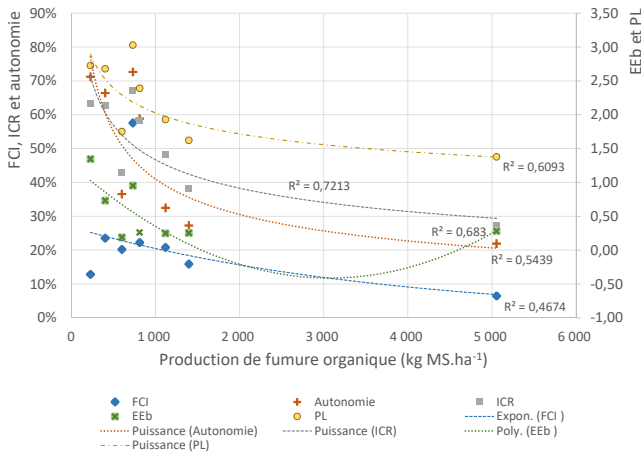


Figure 2 : relation entre la production de fumure organique par hectare cultivé et les indicateurs d'analyse de réseau écologique des exploitations familiales dans l'ouest du Burkina Faso. FCI : Finn cycling index ; ICR : internal recycling rate ; EEB : efficacité énergétique brute ; PL : path length

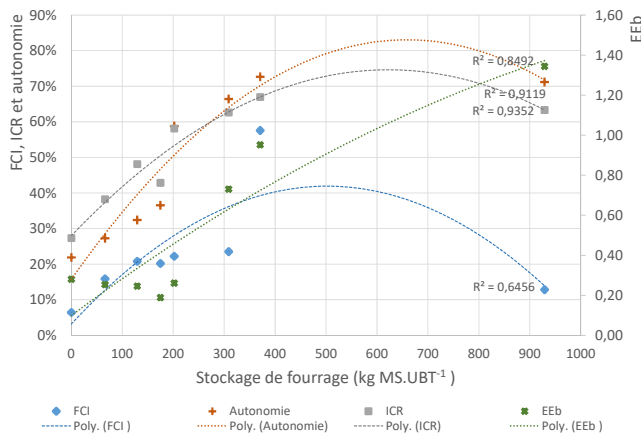


Figure 3 : relation entre le stockage de fourrage par unité de bovin tropical et les indicateurs d'analyse de réseau écologique des exploitations familiales dans l'ouest du Burkina Faso. FCI : Finn cycling index ; ICR : internal recycling rate ; EEB : efficacité énergétique brute ; MS : matière sèche ; UBT : unité bovin tropical

Cependant, le plafonnement de l'efficacité de recyclage, observé dans la figure 3, sous-entend que le stockage des résidus de culture n'était pas la seule pratique améliorant le recyclage. Le recyclage de l'énergie brute se faisait également à travers la vaine pâture des résidus de culture par les animaux de l'exploitation. Ce recyclage interne à l'exploitation peut être limité si les résidus de culture sont prélevés par des animaux extérieurs à l'exploitation. L'énergie brute accumulée est alors exportée, augmentant l'efficacité énergétique brute.

Effet sur les performances du réseau de flux d'énergie brute

L'autonomie (A) a varié de 22 à 73 %. Une exploitation autonome est une exploitation qui valorise des ressources issues de son système. Les plus fortes valeurs étaient observées chez les agriculteurs et les agroéleveurs. Elle était négativement corrélée au chargement animal ($p < 0,05$) et à la taille du troupeau ($p < 0,05$). Les exploitations possédant de grands troupeaux dépendaient beaucoup des importations de l'environnement pour l'alimentation des animaux (pâturage sur parcours, ou vaine pâture sur champs extérieurs).

Les exploitations familiales mixtes étudiées se classaient en deux groupes de valeur selon l'efficacité énergétique brute (EEB) selon

l'absence ($0,19 \leq \text{EEb} \leq 0,28$) ou la présence d'un assolement en coton ($0,73 \leq \text{EEb} \leq 1,34$). La culture du coton est une culture de rente vendue et non comestible. Oléagineuse, elle amplifie les quantités d'énergie exportées à travers l'exportation des graines.

La production de fumure organique par unité de bétail était positivement corrélée à l'autonomie des exploitations ($p < 0,01$; figure 2). La stabulation et l'affouragement des animaux qui permettent une production de fumure organique par unité de bétail importante améliorent l'autonomie des exploitations.

La production de fumure organique par hectare était négativement corrélée à l'autonomie ($p < 0,05$) et à l'efficacité énergétique brute des exploitations. Cette couverture des besoins des sols en fumure organique impliquait une accumulation de déjections animales dans les parcs ou en parage direct, et une importation forte d'énergie brute par le prélèvement des animaux sur les parcours et les champs extérieurs. Elle ne permettait pas d'améliorer les exportations à moindre investissement en biomasses importées.

Le stockage de fourrage était corrélé positivement à l'autonomie ($p < 0,05$) et à l'efficacité énergétique brute ($p < 0,01$) des exploitations familiales mixtes (figure 3). Le stockage de fourrage a diminué les importations par prélèvement des animaux sur les parcours et sur les champs extérieurs.

DISCUSSION

Indicateurs d'analyse de réseau écologique

La densité des liens au sein d'une exploitation familiale mixte, respectant le modèle conceptuel proposé, était comprise entre 0,75 (pas d'IAE active ou passive, pas d'autoconsommation des productions) et 2,2 (IAE active et passive, autoconsommation des productions). Hormis l'incidence du niveau d'agrégation retenu, les flux de matière possibles sont limités à certains échanges entre certains compartiments (Stark, 2016). Dans les écosystèmes naturels, cet indicateur prend davantage de sens en illustrant une richesse des interactions fonctionnelles entre espèces (Fath et al., 2007). L'interprétation écologique de l'indicateur « diversité » est cruciale dans l'étude des agroécosystèmes. Dalsgaard et Oficial (1997), et Reardon (1994) montrent qu'elle contribue à la stabilité des agroécosystèmes par la complémentarité des activités et l'amélioration de l'efficacité d'usage des ressources. De plus, la diversité des activités dans les agroécosystèmes est une forme de gestion des risques pour les ménages pauvres en ressources (Ellis, 2000 ; Niehof, 2004) particulièrement face aux aléas climatiques (Nianogo et Somda, 1999 ; Reardon, 1994), par une multiplication des sources de revenus.

Le recyclage de l'énergie brute était variable d'une exploitation à l'autre ($6 \leq \text{FCI} \leq 58$ %) selon le niveau de stockage des résidus de culture, l'utilisation des résidus de cultures et la production de fumure organique. Il était plus important que le niveau de recyclage de l'azote obtenu dans les exploitations familiales mixtes au Brésil, à Cuba et en Guadeloupe ($0 \leq \text{FCI} \leq 28$ % ; Stark, 2016), à Madagascar ($2,5 \leq \text{FCI} \leq 4,4$ % ; Alvarez et al., 2014) et en Ethiopie ($0,9 \leq \text{FCI} \leq 11$ % ; Rufino et al., 2009b), le recyclage de l'azote s'accompagnant de déperditions importantes (lixiviation, émissions gazeuses). Cependant, un faible recyclage de l'énergie peut déséquilibrer les agroécosystèmes et conduire à leur instabilité impliquant de nécessaires importations pour maintenir ou augmenter les productions. Le recyclage de l'énergie est considéré comme l'une des caractéristiques essentielles pour la stabilité du fonctionnement des écosystèmes (Allesina et Ulanowicz, 2004).

Les efficacités énergétiques brutes obtenues dans cette étude ont été plus faibles que celles obtenues par Vigne (2012) au Mali-Sud ($0,4 \leq \text{EEb} \leq 5,12$). Cette étude s'est appuyée sur un modèle conceptuel

unique des exploitations pour l'étude des exploitations mixtes du Mali-Sud, de l'ouest de la France et de la Réunion où la famille était extérieure au système (fonction d'autoconsommation peu prioritaire) et où le pâturage était interne au système étudié (gestion des pâturages). Les travaux de Alvarez et al. (2014) présentent des efficacités azotées pour les exploitations familiales mixtes de Madagascar de 0,12 à 0,20 alors que les travaux de Stark (2016) présentent des efficacités de 13,6 à 48,3 pour les exploitations de Cuba, du Brésil et de la Guadeloupe. Lorsque la famille est incluse dans le système, les quantités de produits agricoles et animaux échangées avec l'extérieur diminuent, respectant l'objectif premier de satisfaction des besoins alimentaires de la famille (Rufino et al., 2009b).

Les pratiques d'intégration agriculture-élevage améliorent les performances des exploitations familiales mixtes

Les pratiques d'IAE sont des maillons essentiels du recyclage dans les exploitations familiales mixtes représentant, selon le modèle conceptuel retenu, 80 % des flux d'énergie internes à l'exploitation. Ces pratiques se mènent simultanément. La consommation de fourrage stocké ou en vaine pâture interne améliore les conditions de la production de la fumure organique (collecte de refus de fourrage et de déjections animales). Le stockage de résidus de culture améliore l'autonomie et l'efficacité énergétique des exploitations par une réduction des importations de fourrage. En revanche, la production de fumure organique peut s'appuyer sur des importations de fourrage collecté en dehors de l'exploitation, réduisant l'autonomie et l'efficacité de celle-ci mais illustrant un transfert de fertilité depuis le *saltus* vers l'*ager* (Dugué, 1998 ; Landais et Lhoste, 1993).

La notion d'efficacité énergétique brute permet d'illustrer la performance environnementale des activités agricoles (Bonny, 2010). Elle reflète l'importance du prélèvement de biomasses opéré par une exploitation sur le milieu extérieur pour la production d'une unité de biomasse. Pour être efficace, une exploitation exporte des quantités importantes de biomasse réduisant les possibilités de recyclage.

L'efficacité énergétique, le recyclage et l'autonomie sont liés aux pratiques d'IAE à travers les flux entrants. Les pratiques améliorent le recyclage et l'autonomie si elles réduisent directement les importations ou indirectement en créant des flux internes. L'IAE se définit ainsi comme le degré d'interconnexion des activités agricoles et d'élevage, où le recyclage et l'autonomie sont forts (Edwards et al., 1993 ; Rufino et al., 2009b ; Vayssières et al., 2011). Elle permet d'accroître le recyclage et l'autonomie par l'utilisation des coproduits générés sur l'exploitation pour substituer les intrants (Powell et al., 2004 ; Vayssières et al., 2011).

Les pratiques d'intégration agriculture-élevage restent perfectibles

Dans toutes les exploitations étudiées, les pratiques d'intégration agriculture-élevage restent perfectibles. Les besoins fourragers ne sont couverts que de 0 à 41 %. Les éleveurs produisent tout au plus 1,4 t MS.ha⁻¹an⁻¹ comparativement à la dose recommandée de 2,5 t MS.ha⁻¹an⁻¹ (Berger et al., 1987). Ce faible niveau d'IAE s'explique par une faible disponibilité de la main-d'œuvre, des capacités de transport limitées (Landais et Lhoste, 1990 ; Schleil, 1986), l'impossibilité de collecter les déjections des animaux en mobilité, et des surfaces cultivées insuffisantes face aux besoins en fourrage, même avec de hauts rendements. Le faible niveau d'IAE s'explique également par la possibilité de valoriser de manière rentable une diversité d'espaces et de ressources par la mobilité des animaux (Dugué et al., 2013). De plus, il existe une difficulté organisationnelle avec le chevauchement de la récolte des productions agricoles et des résidus de

culture engendrant une insuffisance de main-d'œuvre et des délais courts pour réaliser les travaux.

Face à cela, les paysans du Mali-Sud retardent le début de la période de vaine pâture, offrant le temps nécessaire aux exploitations pour le transport des récoltes et le stockage des résidus de culture (Blanchard et al., 2013 ; Vall et al., 2004). Une meilleure organisation du travail permet à ces producteurs, disposant du même niveau d'équipement en transport, de mobiliser de grandes quantités de résidus de culture et de fumure organique dans la région de Koutiala au Mali-Sud (Blanchard et al., 2013).

Les marges de manœuvre sont théoriquement possibles lorsque l'activité totale du réseau est forte (Stark, 2016). Les exploitations d'éleveurs, avec une forte activité du réseau (TST), sont en théorie les exploitations au plus grand potentiel d'amélioration des pratiques d'IAE et du recyclage de l'énergie. Dans les exploitations des éleveurs, mais aussi des agroéleveurs et des agriculteurs, les pratiques d'IAE pourraient également être améliorées par une augmentation de la quantité des biomasses produites (variété à haut rendement) mais aussi par un changement de qualité des biomasses animales et végétales produites sur les exploitations et échangées au sein du système. Le développement de la place des légumineuses dans le système de culture (culture fourragère ou vivrière en pur, associée, en dérobée, sylvopastoralisme) pourrait permettre d'améliorer le recyclage des coproduits à travers l'affouragement des animaux tout en améliorant la fertilité des sols (Coulibaly, 2012). Ces marges de manœuvre pourraient améliorer l'autonomie, le recyclage et les performances des exploitations familiales mixtes.

Choix d'application de la méthode d'analyse de réseau écologique

La méthode ENA est non statique et, lors de la conceptualisation et de la modélisation du réseau, des choix peuvent être faits (Schaubroeck et al., 2012). L'élaboration du modèle conceptuel utilisé a nécessité de définir le nombre de compartiments retenu (agrégation des compartiments) et les limites du système (inclusion de la famille et du pâturage) selon la disponibilité des données pour quantifier les flux entre les compartiments.

L'agrégation respective des systèmes de cultures et des systèmes d'élevage a été retenue sans tenir compte de leur composition en sous-systèmes, et sans distinguer les différentes cultures et espèces animales élevées. Fath et al. (2013), et Rufino et al. (2009a) montrent qu'une agrégation influence les indicateurs de densité des liens (Li/n) et de recyclage (FCI) réduisant la complexité des réseaux, mais ne modifie pas l'activité du réseau (TST). La densité des liens issue de cette agrégation a varié de 1,6 à 2,2. Bien que la valeur soit faible, elle est plus élevée que celle calculée par Stark (2016 ; $0,3 \leq Li/n \leq 1,0$) dans des systèmes avec une désagrégation des compartiments cultures et troupeau. Envisager une potentielle désagrégation pourrait aboutir à des valeurs élevées avec des tendances similaires. Toutefois, compte tenu des objectifs de l'étude, l'agrégation retenue a permis la comparaison entre exploitations ne disposant pas des mêmes systèmes de culture et d'élevage (Stark, 2016).

De toute évidence, le choix des compartiments inclus dans le système impacte les résultats sur l'efficacité car cela met en jeu des flux entrants et sortants (Vigne, 2012). Le choix du modèle conceptuel doit refléter les propriétés spécifiques des exploitations étudiées. L'intégration de la famille comme un compartiment à part entière s'explique par la place primordiale qu'occupe l'autoconsommation dans ces exploitations familiales. A l'exception des cultures de rente (sésame, coton) et des cultures fourragères (*mucuna*), la plupart des cultures sont en partie autoconsommées (50 à 100 % de l'assolement). L'autoconsommation devient ainsi une forme de recyclage

(flux internes 8 et 22) qui participe à la diversification des activités. Exclure la famille du système, c'est ignorer l'autoconsommation du système étudié. Alvarez et al. (2014), et Rufino et al. (2009b) ont inclus la famille dans le système pour analyser l'autosuffisance alimentaire en azote des petits exploitants. Vigne (2012) et Stark (2016) l'ont exclu car les fermes de l'ouest de la France, de la Réunion ou de Guadeloupe sont avant tout commerciales, orientées vers la vente sur le marché local ou international.

Les systèmes d'élevages étudiés étaient fortement dépendants des parcours pour l'alimentation des animaux. Or ce compartiment est exploité collectivement par de multiples exploitations via leurs troupeaux. Ceci explique le choix de considérer les pâturages comme une composante externe du système, sur lesquels les exploitations n'ont pas de prise de décision.

Enfin, dans ce modèle conceptuel, trois stocks intermédiaires ont été représentés : le stock de fourrage, le stock de fumure organique et le grenier. Stark (2016), dans son étude des pratiques d'IAE en Guadeloupe, au Brésil et à Cuba, considérait également un compartiment biodigesteur/compostage et un autre ensilage. Cette distinction de stocks intermédiaires influence les résultats en augmentant l'activité du réseau de flux. Toutefois, ce choix permet d'illustrer que les flux de biomasse impliquent des pratiques d'IAE actives requérant du travail, du transport et du stockage, avec un processus biophysique de dégradation de la matière et des pratiques d'IAE passives où les flux sont supportés par la mobilité animale lors de la vaine pâture.

La méthode ENA offre une nouvelle vision de l'analyse des pratiques d'intégration agriculture-élevage dans les systèmes de polyculture élevage d'Afrique de l'Ouest, car elle permet l'analyse de la circulation de matière ou d'énergie au sein de systèmes complexes tout en permettant la comparaison de systèmes complexes très divers, ce qui caractérise les exploitations de la région (Vall et al., 2012). C'est un outil qui intègre toutes les spécificités des exploitations pour en donner à travers des indicateurs une reproduction fidèle de l'exploitation considérée. Elle n'est pas partielle mais complète en faisant une analyse holistique de l'exploitation malgré sa complexité.

■ CONCLUSION

La méthode ENA a permis l'analyse de la circulation de matière ou d'énergie au sein de systèmes complexes. Elle s'est révélée pertinente pour l'analyse des pratiques d'intégration agriculture-élevage dans les exploitations de polyculture élevage en permettant de mesurer l'effet des pratiques sur les performances des exploitations. L'analyse des réseaux de flux d'énergie brute a montré une faible diversité du réseau de flux due à l'option d'agrégation des compartiments. Le recyclage de l'énergie brute était faible mais très variable d'une exploitation à l'autre selon le niveau de coordination technique entre les activités agricoles et d'élevage. L'efficacité énergétique brute était également faible dans ces exploitations et dépendait de la présence d'une sole de coton. Cette culture augmentait le poste des exportations, améliorant ainsi l'efficacité énergétique. Enfin, l'autonomie des exploitations était variable, de faible à élevée, et s'expliquait par l'effectif des troupeaux qui impliquait de fortes importations de fourrages des pâturages. Les exploitations restaient dépendantes du milieu extérieur.

Certaines pratiques d'IAE ont amélioré le recyclage, l'autonomie et l'efficacité énergétique. Le stockage des résidus de culture a permis une réduction des importations de fourrage en saison sèche dans les exploitations ayant eu des résidus de culture disponibles sur pied. Cette réduction a amélioré l'autonomie et l'efficacité énergétique et a permis de créer des flux internes améliorant le recyclage.

La production de la fumure organique par unité de surface s'est appuyée sur une importation de fourrages issus des pâturages, ce qui

n'a pas amélioré l'autonomie et l'efficacité énergétique. Cette autonomie diminue même considérablement avec l'augmentation de la taille du troupeau. Toutefois la production de fumure organique par unité de bétail a amélioré le recyclage à partir de la transformation des refus de fourrage, des ordures ménagères et des déjections animales collectées sur l'exploitation (taux de recyclage interne).

Dans les exploitations étudiées, le niveau d'IAE atteint n'a pas été optimal en raison d'une faible disponibilité de la main-d'œuvre, d'une capacité de transport limitée, de l'impossibilité de collecter les déjections d'animaux en mobilité, de surfaces cultivées limitées pour couvrir les besoins des troupeaux à partir de fourrage cultivé. Toutefois, la valorisation d'espaces et de ressources par l'intermédiaire de la mobilité des animaux demeurerait un faible coût d'opportunité pour les exploitations, même si un déploiement d'efforts supplémentaires de mise en œuvre des pratiques d'IAE pouvait assurer de hauts rendements. Les pratiques d'IAE restent perfectibles et permettraient d'améliorer l'autonomie, le taux de recyclage interne et la productivité des exploitations familiales (effort de stockage des résidus de culture et déjections animales, augmentation de la production de biomasse, changement de qualité des biomasses).

REFERENCES

- Allesina S., Ulanowicz R.E., 2004. Cycling in ecological networks: Finn's index revisited. *Comput. Biol. Chem.*, **28**: 227-233, doi: 10.1016/j.compbiochem.2004.04.002
- Alvarez S., Rufino M.C., Vayssières J., Salgado P., Tifton P., Tillard E., Bocquier F., 2014. Whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: An application of network analysis. *Agric. Syst.*, **126**: 25-37, doi: 10.1016/j.agsy.2013.03.005
- Bénagabou O.I., Kanwe B., Vall E., Vigne M., Blanchard M., 2013. Intégration agriculture-élevage et efficacité énergétique des exploitations mixtes au Burkina Faso. *Rencontres Rech. Rumin.*, **20**: 298
- Berger M., Belem P.C., Dakouo D., Hien V., 1987. Le maintien de la fertilité des sols dans l'Ouest du Burkina Faso et la nécessité de l'association agriculture-élevage. *Coton Fibres Trop.*, **42**: 201-210
- Blanchard M., Vayssières J., Dugué P., Vall E., 2013. Local technical knowledge and efficiency of organic fertilizer production in South Mali: diversity of practices. *Agroecol. Sustain. Food Syst.*, **37**: 672-699, doi: 10.1080/21683565.2013.775687
- Bonny S., 2010. L'intensification écologique de l'agriculture : voies et défis. ISDA, Cirad, Inra-SupAgro, Montpellier, France, p. 11
- Boudet G., 1984. Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. IEMVT, Maisons-Alfort, France
- Coulbaly K., Vall E., Autfray P., Sedogo M.P., 2012. Performance technico-économique des associations maïs/niébé et maïs/mucuna en situation réelle de culture au Burkina Faso : potentiels et contraintes. *Tropicicultura*, **30** (3) : 147-154
- Dalsgaard J.P.T., Oficial R.T., 1997. A quantitative approach for assessing the productive performance and ecological contributions of smallholder farms. *Agric. Syst.*, **55**: 503-533, doi: 10.1016/S0308-521X(97)00022-X
- Dorin B., Paillard S., Treyer S., 2010. Agrimonde : Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050. Quae, France
- Dugué P., 1998. Flux de biomasse et renouvellement de la fertilité des sols à l'échelle du terroir. Etude de cas d'un terroir villageois sereer au Sénégal. *Agric. Dév.*, **18**: 99-107
- Dugué P., Andrieu N., Blanchard M., Chia E., Havard M., Le Gal P.Y., Penot E., et al., 2013. Evolutions des relations agriculture élevage en zones de savane africaines et malgaches : quelques enseignements pour la polyculture élevage en France. In : Séminaire national « Les systèmes de polyculture-élevage dans les territoires ». ACTA INRA, Toulouse, France. www.academia.edu/13752794/Evolutions_des_relations_agriculture_%C3_%A9levage_en_zones_de_savane_africaines_et_malgaches_quelques_enseignements_pour_la_polyculture_%C3_%A9levage_en_France?auto=download (consulté le 22 janvier 2016)

- Edwards C.A., Grove T.L., Harwood R.R., Colfer C.P., 1993. The role of agroecology and integrated farming systems in agricultural sustainability. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **46**: 99-121, doi: 10.1016/0167-8809(93)90017-J
- Ellis F., 2000. Rural livelihoods and diversity in developing countries. Oxford University Press, Oxford, UK
- Fath B.D., Patten B.C., 1999. Review of the foundations of network environ analysis. *Ecosystems*, **2**: 167-179, doi: 10.1007/s100219900067
- Fath B.D., Scharler U.M., Baird D., 2013. Dependence of network metrics on model aggregation and throughflow calculations: Demonstration using the Sylt-Rømø Bight Ecosystem. *Ecol. Model.*, **252**: 214-219, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.06.010
- Fath B.D., Scharler U.M., Ulanowicz R.E., Hannon B., 2007. Ecological network analysis: network construction. *Ecol. Model.*, **208**: 49-55, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.04.029
- Finn J.T., 1980. Flow analysis of models of the Hubbard Brook ecosystem. *Ecology*, **61**: 562-571, doi:10.2307/1937422
- Hannon B., 1973. The structure of Ecosystems. *J. Theor. Biol.*, **41**: 535-546, doi: 10.1016/0022-5193(73)90060-X
- Herrero M., Thornton P.K., Notenbaert A.M., Wood S., Msangi S., Freeman H.A., Bossio D. et al., 2010. Smart investments in sustainable food production: Revisiting mixed crop-livestock systems. *Science*, **327**: 822-825, doi:10.1126/science.1183725
- Landais E., Lhoste P., 1990. L'association agriculture-élevage en Afrique intertropicale : un mythe techniciste confronté aux réalités du terrain. *Cah. Sci. Hum.*, **26** : 217-235
- Landais E., Lhoste P., 1993. Systèmes d'élevage et transferts de fertilité dans la zone des savanes africaines. *Cah. Agric.*, **2** : 9-25
- Leontief W.W., 1951. The structure of American economy, 1919-1939: an empirical application of equilibrium analysis. Oxford University Press, New York, USA
- Nations unies, 2014. Situation de la population mondiale en 2014. Rapport concis.
- Nianogo A.J., Somda J., 1999. Diversification et intégration inter-spécifique dans les élevages ruraux au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Env.*, **3** : 133-139
- Niehof A., 2004. The significance of diversification for rural livelihood systems. *Food Policy*, **29**: 321-338, doi: 10.1016/j.foodpol.2004.07.009
- Powell J.M., Pearson R.A., Hiernaux P.H., 2004. Crop-livestock interactions in the West African drylands. *Agron. J.*, **96**: 469-483, doi: 10.2134/agronj2004.4690
- Rae A., Nayga R., Steinfeld H., Mooney H.A., Schneider F., Neville L.E., et al., 2010. Trends in consumption, production, and trade in livestock and livestock products. In: *Livestock in a changing landscape: Drivers, consequences, and responses*, Vol. 1 (Steinfeld H., Mooney H., Scheider F., Neville L.E). DC: Island Press, Washington, USA, 11-33
- Reardon T., 1994. La diversification des revenus au Sahel et ses liens éventuels avec la gestion des ressources naturelles par les agriculteurs. In : Séminaire Cirad/FAO, Agriculture durable dans la zone soudano-sahélienne, Dakar, Sénégal, 11-14 jan. 1994
- Rufino M.C., Hengsdijk H., Verhagen A., 2009a. Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **84**: 229-247, doi: 10.1007/s10705-008-9239-2
- Rufino M.C., Titttonell P., Reidsma P., López-Ridaura S., Hengsdijk H., Giller K.E., Verhagen A., 2009b. Network analysis of N flows and food self-sufficiency – a comparative study of crop-livestock systems of the highlands of East and Southern Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **85**: 169-186, doi: 10.1007/s10705-009-9256-9
- Schaubroeck T., Staelens J., Verheyen K., Muys B., Dewulf J., 2012. Improved ecological network analysis for environmental sustainability assessment; a case study on a forest ecosystem. *Ecol. Model.*, **247**: 144-156, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.08.018
- Schleich K., 1986. Is manure to replace fallow land? Possible utilization of manure as prevailing in Occidental Africa savannah. *Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop.*, **39** (1): 97-102, doi: 10.19182/remvt.8616
- Sims R.E., 2011. Energy-smart food for people and climate. FAO, Rome, Italy, 66 p.
- Smith J.W., Naazie A., Larbi A., Agyemang K., Tarawali S., 1997. Integrated crop-livestock systems in sub-Saharan Africa: An option or an imperative? *Outlook Agric.*, **26** (4): 237-246, doi: 10.1177/003072709702600405
- Stark F., 2016. Evaluation agroécologique des pratiques d'intégration agriculture-élevage : Application de l'analyse de réseau écologique à des exploitations agricoles en milieu tropical humide. Thèse Doct., AgroParisTech, Montpellier, France, 246 p., <http://prodirna.inra.fr/record/355944>
- Traoré M., Nacro H.B., Ouédraogo D., Sanou M.R., 2013. Dynamique et performance économique des systèmes de production agricole à base de coton dans les villages de Karaborosso et de Kotoura (Ouest du Burkina Faso). *Sci. Chang. Planétaires Sécheresse*, **24** : 115-128, doi: 10.1684/sec.2013.0383
- Ulanowicz R.E., 2001. Information theory in ecology. *Comput. Chem.*, **25**: 393-399, doi: 10.1016/S0097-8485(01)00073-0
- Vall E., Chia E., Blanchard M., Koutou M., Coulibaly K., Andrieu N., 2016. La co-conception en partenariat de systèmes agricoles innovants. *Cah. Agric.*, **25** (1), 15001. doi : 10.1051/cagri/2016001
- Vall E., Dongmo A.L., Ndao T., Ilboudo I., 2004. Evolution of draft animal power practices and consequences on crop systems sustainability. *Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop.*, **57** (3-4): 145-155, doi: 10.19182/remvt.9885
- Vall E., Dugué P., Blanchard M., 2006. Le tissage des relations agriculture-élevage au fil du coton. *Cah. Agric.*, **15** : 72-79
- Vall E., Diallo M.A., 2009. Savoirs techniques locaux et pratiques : la conduite des troupeaux aux pâturages (Ouest du Burkina Faso). *Nat. Sci. Sociétés*, **17** : 122-135, doi: 10.1051/nss/2009024
- Vall E., Koutou M., Blanchard M., Coulibaly K., Diallo A.M., Andrieu N., 2012. Evolutions des relations agriculture élevage en zones de savanes africaines et malgaches : quelques enseignements pour la polyculture élevage en France. In : Sémin. national Les systèmes de polyculture-élevage dans les territoires, ACTA INRA, Toulouse, France, 4-5 juin 2013
- Vayssières J., Vigne M., Alary V., Lecomte P., 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agric. Syst.*, **104**: 146-161, doi: 10.1016/j.agry.2010.05.008
- Vigne M., 2012. Flux d'énergie au sein de systèmes d'élevage laitier contrastés : élaboration d'indicateurs et analyse de la diversité inter- et intra-territoire. Thèse doct., Agro Campus Ouest, Bretagne, France, 271 p.

Summary

Bénagabou O.I., Blanchard M., Bougouma/Yaméogo V.M.C., Vayssières J., Vigne M., Vall E., Lecomte P., Nacro H.B. Does crop-livestock integration improve energy-use efficiency, recycling and self-sufficiency of smallholder farming systems in Burkina Faso?

Faced with the major challenge of global population growth, the agricultural sector must reconcile an increase in food production with a decrease in its environmental impact. Crop-livestock integration (CLI) by mixed family farms with low-level inputs may be one way of doing this. One of CLI main principles is to use the resources produced by the various activity units on the farm to manage other units. CLI is built around three major practices: animal draft, forage storage, and organic manure production. The objective of this study was to analyze the effects of these practices on the autonomy, recycling and energy efficiency of mixed family farms. To do this, the gross energy flows of eight mixed family farms in the cotton-growing area of Western Burkina Faso, monitored over a twenty months' period, were analyzed with the ecological network analysis (ENA) method. The results showed that fodder storage and organic manure production enabled farms to increase recycling and autonomy, and to acquire better energy efficiency. The ENA method highlights the characteristics and performance of farms of different types (crops, crop-livestock, and livestock). It also assesses the contribution of CLI practices to this performance. However, there remains leeway on the level of implementation of CLI practices to improve energy recycling on mixed family farms in the cotton-growing area of Western Burkina Faso.

Keywords: mixed farming, organic recycling, feed crop, crop residue, agroecology, efficiency, Burkina Faso

Resumen

Bénagabou O.I., Blanchard M., Bougouma/Yaméogo V.M.C., Vayssières J., Vigne M., Vall E., Lecomte P., Nacro H.B. La integración de cultivos-ganadería mejora la eficiencia del uso de energía, reciclaje y auto suficiencia de los pequeños sistemas finqueros en Burkina Faso?

Frente al gran reto del crecimiento global de la población, el sector agrícola debe reconciliar un aumento en la producción de alimentos con una disminución de su impacto ambiental. La integración de cultivos-ganadería (ICG) en fincas familiares mixtas con bajo nivel de ingresos puede ser una manera de lograrlo. Uno de los principales principios de ICG es el de usar los recursos producidos por las varias unidades de actividad en la finca, para manejar otras unidades. ICG se construye alrededor de tres prácticas principales: tiro animal, almacenamiento del forraje y producción orgánica de estiércol. El objetivo del presente estudio fue analizar los efectos de estas prácticas sobre la autonomía, reciclaje y eficiencia energética de las fincas familiares mixtas. Para esto, se analizó mediante el método de análisis de red ecológica (ENA), el flujo bruto de energía de ocho fincas familiares mixtas en la región criadora de algodón del oeste de Burkina Faso, monitoreadas durante un periodo de veinte meses. Los resultados mostraron que el almacenamiento de forraje y la producción de estiércol orgánico permitieron a las fincas aumentar el reciclaje y la autonomía, y adquirir mejor eficiencia energética. El método ENA subraya las características y rendimiento de fincas pertenecientes a diferentes estructuras (fincas de cultivo, fincas cultivo-ganadería y fincas de ganaría). También evalúa la contribución de las prácticas de ICG a este rendimiento. Sin embargo, queda margen a nivel de la implementación de las prácticas de ICG para mejorar el reciclaje de energía en las fincas familiares mixtas en la zona criadora de algodón del oeste de Burkina Faso.

Palabras clave: explotación agrícola combinada, reciclaje orgánico, planta forrajera, residuo de cosecha, agroecología, eficacia, Burkina Faso

