

Liste des abréviations

A :	Autonomie
CA :	Chargement animal
CBF :	Couverture des besoins en fourrage
CBFO :	Couverture des besoins en fumure organique
CBTA :	Couverture des besoins en traction animale
CEB :	Consommation d'énergie brute
CEF :	Consommation d'énergie fossile
CES :	Consommation d'énergie solaire
CET :	Consommation d'énergie du travail
CH₄ :	Méthane
CIRAD :	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CIRDES :	Centre International de Recherche Développement sur l'Elevage en zone Subhumide
CMV :	Complexe minéraux et vitamines
CO₂ :	Dioxyde de carbone
EB :	Energie brute
EEB :	Efficiencé énergétique brute
EEF :	Efficiencé énergétique fossile
EES :	Efficiencé énergétique solaire
EET :	Efficiencé énergétique du travail
EF :	Energie fossile
ENA :	Ecological network analysis (analyse des réseaux écologiques)
ES :	Energie solaire
ET :	Energie du travail
FCI :	Finn cycling index (indice de recyclage de Finn)
FO :	Fumure organique
GES :	Gaz à effet de serre
IAE_A :	Intégration agriculture-élevage active
IAE_{AP} :	Intégration agriculture-élevage intermédiaire
IAE_P :	Intégration agriculture-élevage passive
ICR :	Internal Cycling Rate (taux de recyclage interne)
N₂O :	Protoxyde d'azote
PAR :	Photosynthetically Active Radiation (radiation photosynthetiquement active)
PEB :	Production d'énergie brute
PL :	Path lengh
RDC :	Résidus de culture
S.d.	Sans dimension
TA :	Traction animale
TST :	Total system throughflow (flux traversant total du système)
UBT :	Unité bétail tropical
VP :	Vaine pâture

SOMMAIRE

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS.....	II
AVANT-PROPOS.....	V
RESUME.....	VIII
ABSTRACT	IX
LISTE DES ABREVIATIONS	X
SOMMAIRE.....	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I. REVUE DE LITTERATURE	7
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES	36
CHAPITRE III. PERFORMANCE ENERGETIQUE FOSSILE DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE DE L'OUEST DU BURKINA FASO : ROLE DES PRATIQUES D'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE	69
CHAPITRE IV. L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE AMELIORE-T-ELLE L'EFFICIENCE, LE RECYCLAGE ET L'AUTONOMIE ENERGETIQUE BRUTE DES EXPLOITATIONS FAMILIALES MIXTES AU BURKINA FASO ?	90
CHAPITRE V: ROLE DE L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE DANS LA MOBILISATION DES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIE : EVALUATION PLURI-ENERGIE DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE ELEVAGE DE L'OUEST DU BURKINA FASO	111
CHAPITRE VI. DISCUSSION GENERALE.....	137
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	149
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	154
ANNEXE.....	I
TABLE DES MATIERES.....	XXVIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XXXII
LISTE DES FIGURES.....	XXXII
LISTE DES ANNEXES.....	XXXIII

INTRODUCTION GENERALE

1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : UN ENJEU PRIORITAIRE

La lutte contre le réchauffement climatique d'origine anthropique de la planète terre, désormais sans équivoque, devient l'enjeu prioritaire pour le maintien de l'humanité. Ce réchauffement est dû à l'émission dans l'atmosphère d'importantes quantités de gaz à effet de serre (GES), sans cesse croissantes depuis l'époque préindustrielle, dont les plus importants sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) (Pachauri et Reisinger., 2007). Tous les secteurs sont responsables de ces émissions avec l'approvisionnement énergétique (25,9% des émissions mondiales estimées en 2014), l'industrie (19,4%), la foresterie (17,4%), l'agriculture (13,5%), les transports (13,1%) et les déchets et eaux usées (2,8%) (Pachauri et Reisinger., 2007). Une des conséquences du changement climatique observée est la hausse de la température moyenne de l'atmosphère qui a des impacts sans précédents sur le climat et la pluviométrie et, entre autre, l'agriculture (Soussana, 2012). Face à cette situation, le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) vient de rendre un nouveau rapport et invite les autorités, les entreprises et les habitants à engager des changements « *rapides* » et « *sans précédents* » afin de limiter l'augmentation de la température à 1,5°C par rapport à l'époque préindustrielle, prévue par les accords de Paris (IPCC, 2018). Face à l'urgence de l'action à mettre en œuvre, des efforts de mitigation doivent être imposés aux différents secteurs d'activités dont l'agriculture (Pachauri et Reisinger., 2007 ; OCDE, 2016 ; Benoit *et al.* 2017), en plus, des efforts nécessaires d'adaptation du secteur agricole au changements à venir (Seguin, 2003). De nombreuses études sont réalisées pour évaluer l'impact des différents secteurs d'activités sur le climat (Thornton *et al.*, 2014), identifier les améliorations possibles, et définir des options possibles d'atténuation des émissions de GES et « d'émissions négatives » (capture du CO₂ par les ressources forestières et les sols). Ces options doivent par la suite se traduire en décisions politiques pour être développées à large échelle. Le secteur agricole contribue de façon importante au changement climatique à travers la combustion d'énergie fossile pour la production des intrants agricoles et d'élevage et la conduite des machines agricoles, certaines activités spécifiques de l'agriculture (labour, irrigation des sols, épandage de fertilisants, brûlis, etc.), et de l'élevage (ruminant, gestion des effluents, etc.) et les changements d'utilisation des terres (OCDE, 2016 ; Bellarby et Foreid, 2008).

2. UNE CROISSANCE DE LA PRODUCTION AGRICOLE ATTENDUE

De 1 milliard d'habitants en 1800, la population mondiale a atteint 7,2 milliards en 2015 et les prédictions convergent vers une population mondiale de 9,2 milliards d'habitants sur la terre en 2050 (Nations Unies, 2014). En parallèle, on observe depuis une décennie, un important

changement du régime alimentaire de la population mondiale (Tiffen, 2004) avec une consommation de plus en plus forte des produits animaux (lait, viande, œuf...) (Pingali, 2007, Rae *et al.*, 2010) particulièrement par les classes moyennes et les populations urbaines des pays d'Asie et d'Amérique Latine alors que la consommation de viande se stabilise dans les pays occidentaux (Garnett *et al.*, 2013). Un maintien dans le temps de ces tendances sur la démographie mondiale, l'économie des ménages et la consommation de produits animaux entraînera un doublement rapide de la demande en produits alimentaires et en produits animaux en particulier.

Les surfaces en culture et en pâturage devraient alors s'étendre, en particulier en Afrique subsaharienne et en Amérique latine (Schmidhuber et Tubiello, 2007) ; afin de satisfaire les besoins alimentaires de la population humaine en perpétuelle croissance.

3. QUELS SYSTEMES IMPLIQUES DANS L'ACCROISSEMENT DE LA PRODUCTION AGRICOLE ?

L'agriculture hautement productive déployée dans les pays du Nord fortement industrialisés rencontre des limites importantes qui remettent en cause son modèle technologique (Griffon, 2014). En effet, très consommateur d'intrants chimiques (produits phytosanitaires, engrais minéraux), avec une forte mécanisation des moyens de production ; ce modèle de production s'est rapidement déconnecté des potentialités du milieu naturel (Zahm *et al.*, 2015), bien qu'il ait conduit à augmenter considérablement la productivité par surface et par unité animale (Griffon, 2014). Après une augmentation des surfaces emblavées et des rendements agricoles, ceux-ci finissent par stagner (INRA et CIRAD, 2009 ; Soussana, 2012) et les terres agricoles sont en fortes concurrences avec les autres activités économiques (habitation, industrie, transport...). Ces modèles agricoles sont en cause dans des désordres environnementaux (perte de la biodiversité et de la qualité des eaux de surface, émissions de particules fines, recours aux pesticides, etc) et sanitaires (résistance aux antibiotiques, transmission et diffusion de pathogènes, etc (Celette *et al.*, 2009 ; Thompson, 2010 ; Soussana, 2012).

L'accroissement tendanciel et la variabilité du prix du pétrole brut participent à l'augmentation du prix des intrants dont ils sont dépendants (Ziesemer, 2007 ; Heinberg et Bomford, 2009 ; Kim, 2009 ; Griffon, 2014). Enfin ces modèles sont dépendants de ressources fossiles dont l'épuisement des réserves est prévisible (d'ici à 2100) (Tissot, 2001). Malgré des efforts d'économies d'énergie fossile, voire, leur substitution de plus en plus importante par des énergies renouvelables (Cascailh *et al.*, 2012), il sera difficile de mettre à contribution ces systèmes agricoles intensifs pour accroître la production alimentaire.

Les systèmes agricoles dans les pays en développement, moins industrialisés, consomment très peu d'énergie fossile et n'utilisent pratiquement pas d'intrants (aliments du bétail, engrais et pesticides pour la production du pâturage). Ces systèmes ont recours aux ressources de la nature et du travail musculaire pour assurer la fertilité des sols et l'alimentation des animaux (Griffon, 2014). La distribution d'aliments de moindre qualité avec une plus faible digestibilité aux animaux, et la mauvaise gestion des déjections animales conduisent à des émissions importantes de méthane (Chagunda *et al.*, 2010). Les caractéristiques de ces systèmes expliquent les faibles productivités agricole et d'élevage. Pour accroître la production, ils ont recours à une conversion d'une part importante des forêts en terre agricole (Bellarby et Foreid, 2008). Les faibles productivités de ces systèmes offrent une opportunité pour les mobiliser dans l'objectif d'accroissement de la production agricole mondiale.

4. COMMENT RELEVER LE DEFI DE DURABILITE DU SECTEUR AGRICOLE ?

L'un des grands défis du XXI^e siècle sera d'accroître l'offre alimentaire en produits végétaux et animaux pour répondre aux besoins d'une population mondiale qui devrait dépasser les 9 milliards d'habitants en 2050 (Nations Unies, 2014), tout en développant un secteur agricole compatible avec les limites environnementales de la planète (réduction de l'usage des ressources en eau, énergie fossile, intrants, conversion des terres) (Tilman *et al.*, 2002 ; Griffon 2014), et en faisant face aux contraintes économiques et sociales (Cassman, 1999 ; Garnett *et al.* 2013).

Dans ce contexte, les nouveaux systèmes de production à concevoir devront s'inscrire dans la vision de l'agriculture durable. Pour réussir ce pari, ces nouveaux modes de production devront avoir en commun les principes fondamentaux suivants : favoriser la valorisation des énergies renouvelables, réduire l'usage des énergies non renouvelables et des intrants de synthèse sous leurs formes actuelles et s'appuyer sur une utilisation des fonctionnalités naturelles des écosystèmes (Altieri, 1986 ; Dufumier, 2009 ; Griffon, 2014). Plusieurs modèles et supports de production sont proposés passant des concepts de la révolution verte à l'agroécologie, de systèmes spécialisés à des systèmes mixtes mettant en œuvre différentes pratiques telles que l'intégration agriculture-élevage (IAE), l'agroforesterie, l'aquaculture, etc (Conway, 2005).

L'agroécologie est un concept développé visant à assurer une durabilité des exploitations agricoles. C'est un mode de production qui promeut le respect des grandes lois d'équilibre écologique (Altieri *et al.*, 2012 ; Bonny, 2011 ; Doré *et al.*, 2011 ; Tiftonell, 2014).

5. UNE PRATIQUE AGROECOLOGIE QUI GAGNE DU TERRAIN : L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE

L'IAE est un ensemble de pratiques agricoles mettant en relation étroite les composantes agricole et d'élevage d'une exploitation de polyculture-élevage ou d'un territoire non spécialisé. Elle a été initialement introduite en Afrique subsaharienne dès les années 50 pour valoriser le recours à l'énergie animale, par le biais de la traction animale, afin d'améliorer la productivité de la terre et du travail. Puis, elle a évolué pour assurer un échange de matières entre les composantes agricole et d'élevage (Lhoste *et al.*, 2010 ; Dugué *et al.*, 2013) à travers la production et le stockage de fourrage et la production et l'épandage de fumure organique. Ces dernières années, elle est présentée comme une opportunité pouvant contribuer à la durabilité des systèmes agricoles. Elle assure une diversité d'activités sur l'exploitation (Rufino *et al.*, 2009a) et, appelle à une mobilisation de processus écologiques tel le recyclage (Bonaudo *et al.*, 2014 ; Stark, 2016 ; Powell *et al.*, 1996). Elle joue un rôle dans la fertilité des sols, le recyclage et l'efficacité d'utilisation de la matière (Van Keulen et Schiere, 2004). Elle permet aussi la valorisation d'énergies renouvelables (énergie brute et énergie du travail) (Vigne *et al.*, 2014) contribuant à la réduction de l'utilisation des énergies fossiles (Ziesemer, 2007 ; Gerber *et al.*, 2013 ; Vigne *et al.*, 2013).

La pratique d'IAE peut être considérée à deux échelles : à l'échelle de l'exploitation mixte et à l'échelle du territoire (Powell *et al.*, 1996 ; Lhoste, 2004a ; Dugué *et al.*, 2013). Cette double échelle de lecture implique une diversité de mise en œuvre offrant de multiples possibilités d'échanges de matière entre composantes et d'avec l'environnement. On observe donc une diversité de modalités de production de fumure organique (Berger, 1996a ; Blanchard, 2010), de pratiques de gestions de l'affouragement des animaux (Delma, 2016) et de mode de conduite des animaux au pâturage (Vall et Diallo, 2009). Cette diversité de mise en œuvre des pratiques conduit à une diversité de performance des exploitations en matière de gestion de la fertilité des sols et d'affouragement des animaux (Vall *et al.*, 2011). Bénagabou (2013) a caractérisé le degré d'intégration entre les composantes agricole et d'élevage pour une diversité d'exploitation mixte au Burkina Faso et a estimé leurs performances propres.

Cette approche classique n'est pas la seule permettant de définir les propriétés acquises par l'exploitation agricole via la mise en œuvre des pratiques d'IAE. Dans la quête d'une meilleure durabilité des exploitations agricoles, la performance peut être évaluée au moyen des interactions entre processus biochimiques au sein des agroécosystèmes (recyclage), de l'autonomie, et de l'efficacité de la ressource utilisée, particulièrement intéressant sur les ressources limitées (Rufino *et al.*, 2009a ; Dalsgaard *et al.*, 1995 ; Stark, 2016). Enfin, l'étude de la durabilité des exploitations peut se baser également sur une analyse de la nature des énergies utilisées pour son fonctionnement, permettant de les positionner selon leurs effets

sur les contributions à la réduction de l'usage des énergies fossiles, et l'usage raisonnée des énergies renouvelables.

L'étude du fonctionnement énergétique et écologique des exploitations parait nécessaire pour compléter les connaissances sur la durabilité des exploitations agricoles mettant en œuvre des pratiques d'intégration agriculture-élevage, afin de définir leurs contributions possibles au développement d'une agriculture durable.

Cette thèse s'attache particulièrement à identifier des formes d'intégration agriculture-élevage favorables à une meilleure efficacité énergétique des systèmes agricoles.

Trois **hypothèses** ont soutenu les travaux de la thèse :

- H1. L'intégration agriculture-élevage favorise l'efficacité énergétique ;
- H2. Il existe différentes formes d'intégration agriculture-élevage caractérisables grâce à plusieurs indicateurs d'intégration agriculture-élevage ;
- H3. Il existe une diversité de systèmes mixtes agriculture-élevage mobilisant différemment les différentes formes d'énergies.

Par conséquent **l'objectif général** de ce travail est d'étudier la structure et le fonctionnement des exploitations agricoles afin d'identifier des formes d'intégration agriculture-élevage permettant d'atteindre des performances énergétiques élevées.

Pour tester les trois hypothèses avancées, la thèse est structurée en six chapitres. A la suite de cette introduction générale, une synthèse bibliographique (CHAPITRE I) a été réalisée à partir de notes issues de la littérature scientifique pour comprendre le contexte actuel de la production agricole mondiale, la « durabilité des systèmes agricoles », l'émergence de nouveaux concepts comme « l'agroécologie », le regain d'intérêt pour certains types de systèmes de production agricole « familiaux », la promotion et l'attention accordée à certaines pratiques agricoles « d'intégration agriculture-élevage », et de l'intérêt d'emprunt de méthode conçue en écologie pour évaluer la durabilité des systèmes agricoles avec « l'analyse des réseaux ». Concernant le contexte régional, il s'agissait d'étudier l'historique de l'évolution des pratiques d'IAE en Afrique de l'ouest.

Le CHAPITRE II présente les caractéristiques biophysiques et socioéconomiques de la zone d'étude ainsi que les différentes méthodes retenues pour ce travail. Les trois chapitres suivants constituent la partie « Résultats » des différentes activités réalisées et répondent successivement aux trois hypothèses présentées ci-dessus. Ils sont présentés sous le format d'articles scientifiques (à soumettre, publiés, et en préparation). La première partie des résultats (CHAPITRE III) porte sur l'analyse énergétique des exploitations agricoles et leur lien avec les pratiques d'intégration agriculture-élevage ; ce chapitre décrit le fonctionnement énergétique des exploitations en tenant compte uniquement des énergies brutes et fossiles.

La deuxième partie des résultats (CHAPITRE IV) porte sur la caractérisation des formes d'IAE et à l'appréciation de la durabilité de ces exploitations à partir du recyclage, de l'autonomie et de l'efficacité énergétique brute. La troisième partie des résultats (CHAPITRE V) porte sur l'analyse pluri-énergie et son lien avec les formes d'IAE ; ce chapitre décrit le fonctionnement énergétique de l'exploitation en tenant compte des quatre formes d'énergies mobilisables. La discussion générale (CHAPITRE VI) présente la complémentarité des quatre approches utilisées et fournit une compréhension globale de la durabilité des exploitations de polyculture-élevage à partir des pratiques d'IAE, mais aussi de l'intégration des activités et du fonctionnement énergétique des exploitations. Enfin, les conclusions du travail et les perspectives qui peuvent en être tirées sont présentées.

CHAPITRE I. REVUE DE LITTÉRATURE

1.1. LE CONCEPT DE DURABILITE DE L'AGRICULTURE

1.1.1. Limites de l'agriculture conventionnelle issue de la révolution verte

Les systèmes agricoles ont connu depuis la deuxième moitié du XXème siècle de profondes modifications de structure et de fonctionnement, appelées « *révolution verte* ». Les progrès scientifiques et techniques ont permis l'adoption de la monoculture sur de grandes surfaces, le raccourcissement ou la suppression des rotations culturales, l'utilisation sans cesse croissante d'intrants de synthèse (engrais minéraux, herbicides, insecticides, fongicides, etc.) pour lutter contre les bio-agresseurs et gérer la fertilité des sols et l'enherbement, un recours massif à l'eau d'irrigation et à l'énergie fossile (motorisation des travaux agricoles et de post-récolte économisant la main-d'œuvre) et un recours généralisé aux variétés améliorées. Ces changements ont permis une augmentation rapide et colossale des productions agricoles, d'élevage et de la productivité de la terre et du travail (Meynard et Girardin, 1991).

Cependant, les conséquences de l'agriculture issue de la révolution verte sur l'environnement sont maintenant reconnues, très nombreuses et multiformes. Ces évolutions ont eu pour effet de fragiliser les agroécosystèmes et d'occasionner de très nombreuses externalités négatives. Les produits agricoles concernés par la révolution verte restent limités et très standards uniquement centrés sur les principaux biens de consommation humaine, uniformisant les espèces et les variétés cultivées, et réduisant la biodiversité domestique (cultivée et élevée). L'amélioration des productions agricoles n'a pas permis d'éradiquer la faim dans le monde et les systèmes alimentaires actuels engendrent « *une épidémie mondiale d'obésité* » (FAO, 2018). L'artificialisation des milieux cultivés a également engendré une baisse drastique de la biodiversité sauvage (destruction des habitats, disparition d'espèces des chaînes trophiques, etc.), un abaissement des nappes phréatiques, une pollution de l'air, des eaux et des sols à partir des résidus de pesticides, d'antibiotiques ou des excédents de fertilisants (Burel et Garnier, 1994) ; une détérioration de la qualité des aliments consommés (Guéguen et Pascal, 2010), des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de particules fines importantes (Villenave *et al.*, 2012 ; Roussel, 2013), la prolifération d'insectes prédateurs et de maladies résistants aux traitements (Matson, 1997 ; Tilman *et al.*, 2002 ; Russell *et al.*, 2008), la multiplication d'espèces invasives dont la gestion devient problématique (enherbement avec des herbes invasives, dissémination d'insectes), la réduction du taux de matière organique des sols et l'épuisement des sols en certains oligo-éléments essentiels (Bado *et al.*, 1997, Koulibaly *et al.*, 2010), l'acidification et la salinisation des sols irrigués (Ziadi *et al.*, 2007), etc. Depuis plus d'une dizaine d'années, les chercheurs signalent un ralentissement de l'augmentation des rendements moyens des céréales dans le monde, voire une diminution

dans certaines régions (Griffon, 2006 ; Gallais *et al.*, 2010). Les institutions de recherche agricole sont unanimes sur la nécessité de changer de paradigme en développant de nouveaux modèles de production agricole (Bonny, 2011). Afin de répondre aux nouveaux défis de l'agriculture, il paraît nécessaire de « *rompre avec le paradigme habituel d'une agriculture qui artificialise, uniformise et standardise toujours plus et qui force le système biologique* » (Lavorel et Boulet, 2010). L'agriculture d'aujourd'hui doit être durable, en permettant une production agricole soutenue pour nourrir une population sans cesse croissante, permettre aux agriculteurs de développer des activités rentables, viables et vivables, tout en préservant les ressources naturelles et l'environnement (limitation de l'accroissement des surfaces agricoles et de l'usage de certaines ressources sensibles, atténuation des émissions des GES) (Charles et Youngberg, 1990).

Il existe une diversité de définitions de l'agriculture durable, parfois contradictoire, ou complémentaire, (Zahm *et al.*, 2015). Pour pallier cela, le Sommet mondial de l'alimentation de 1996 formule, sept objectifs environnementaux ou alimentaires à atteindre in Hulse (2008) : (i) atteindre une production agricole acceptable et adéquate sur le plan des quantités, de la variété et de la qualité ; (ii) maintenir des environnements favorables aux humains et autres organismes vivants ; (iii) prévenir la pollution des eaux superficielles et souterraines et protéger la nature ainsi que les droits des animaux ; (iv) empêcher ou limiter la destruction et la détérioration des terres fertiles par l'érosion, l'étalement urbain ou les activités néfastes pour l'agriculture ; (v) établir et maintenir les infrastructures rurales indispensables à la production et à la commercialisation des produits agricoles ; (vi) protéger les écosystèmes naturels et privilégier la conservation à long terme plutôt que l'exploitation à court terme ; (vii) favoriser le recyclage des nutriments et maintenir un bon équilibre entre l'utilisation immédiate et la stabilité à long terme.

1.1.2. Evolution des modes de production agricole après la révolution verte

Une large diversité de voies a été proposée pour faire évoluer les modèles de production agricole à la suite de la révolution verte. Trabelsi (2017) propose un gradient des différents concepts de la transition agroécologique depuis l'agriculture conventionnelle vers une agriculture à haute valeur environnementale (Figure 1). La plupart de ces concepts promeuvent la mobilisation croissante de processus naturels comme facteur de production de l'agriculture en remplacement des intrants classiques (Bonny, 2010 ; Griffon, 2013).

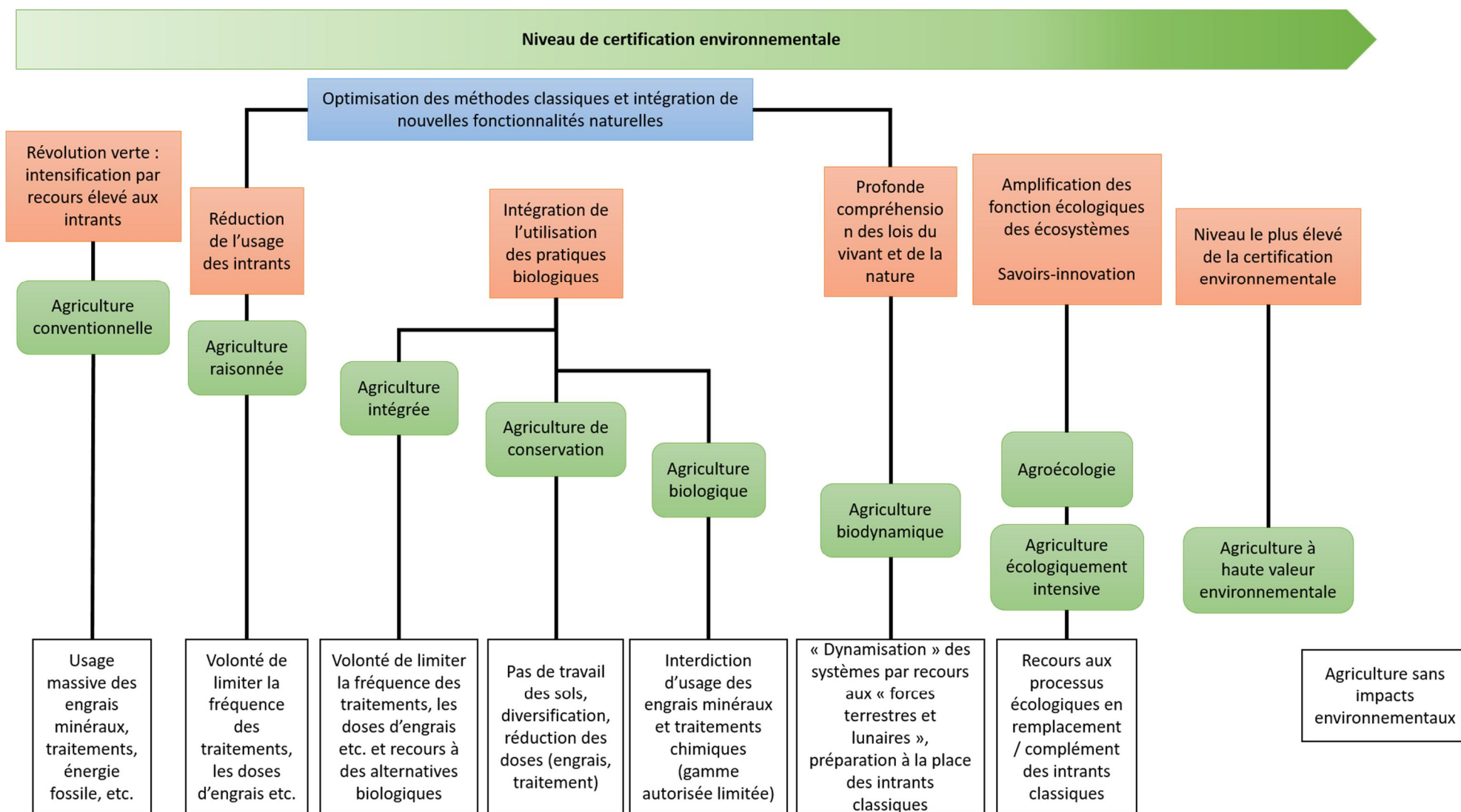


Figure 1. Diversité des modèles de production agricole (adapté de Trabelsi, 2017)

Les différents modèles de production agricole peuvent être regroupés en quatre grands types selon le niveau de mobilisation des intrants, et les objectifs spécifiques assignés à l'agriculture au-delà des objectifs de production (durabilité sociale, biodiversité, etc.) (Inter-reseau, 2011). Les 1^{es} types de modèles agricoles sont ceux qui mettent en avant des processus de production plus écologiques tout en continuant à mobiliser des intrants classiques (engrais minéraux, herbicides, pesticides, etc.) et la motorisation. **L'agriculture de conservation** (FAO, 2005) a été proposé pour concilier un haut niveau de productivité agricole, une amélioration de la fertilité des sols et un meilleur contrôle de l'érosion à travers trois critères : une perturbation minimale du sol (labour par semis direct sans labour), la protection du sol par une couverture végétale permanente (morte ou vivante) et une diversification des cultures (succession, association de cultures). **L'agriculture raisonnée** (Eastes, 2010) vise-elle une optimisation du résultat économique par la maîtrise des quantités d'intrants utilisées afin de limiter leurs impacts sur l'environnement (adaptation des doses d'engrais épandues aux besoins réels des plantes).

Les 2^{nds} types de modèles agricoles sont caractérisés par un non-usage de l'ensemble des intrants chimiques ou de synthèse. Ainsi, en **agriculture biologique**, les agriculteurs doivent respecter un cahier des charges précises spécifiant l'interdiction d'utiliser la plupart des intrants chimiques, le recours à la fertilisation avec des engrais d'origine organique, et l'ensemble des pratiques agricoles favorables à la préservation des ressources. Ils obtiennent une labélisation de leurs produits (ex. label biologique, AB) leur permettant une meilleure valorisation économique. Selon l'**agriculture biodynamique** (Lamine et Bellon, 2009 ; Eastes, 2010 ; Paull, 2011), l'exploitation est un « organisme vivant » qui doit être le plus diversifié, le plus autonome possible et utiliser le minimum d'intrants, en s'appuyant sur l'usage de préparations à base de plantes en respectant l'influence des rythmes lunaires et planétaires. Le 3^e ensemble de modèles agricoles met en avant le recours à des processus naturels et des systèmes de production plus écologiques tout en élargissant les fonctions assignées à l'agriculture (durabilité sociale, renforcement de la sécurité alimentaire, biodiversité). Cette étude fait référence à des concepts clefs mobilisés pour développer ces modèles agricoles (agroécologie et intensification écologique).

L'agriculture écologiquement intensive vise à concevoir une agriculture productive, plus économe en intrants et moins nocive pour l'environnement. Il s'agit d'intensifier des mécanismes naturels des écosystèmes. Cette approche n'exclut pas l'usage d'engrais et de pesticides de synthèse. Elle vise à promouvoir la combinaison d'une productivité élevée et de vertus environnementales (Lavorel et Boulet, 2010 ; Griffon, 2013). L'**agroécologie**, initialement développée en Amérique latine, à travers l'étude intégrative du système alimentaire, englobant les dimensions écologiques, économiques et sociales, permet d'augmenter la production agricole en améliorant la durabilité à long-terme des systèmes de

production (Altieri *et al.*, 1983 ; Altieri, 1986, 2002). Le concept d'**evergreen agriculture** vise à renforcer la place de l'arbre dans les systèmes agricoles et d'élevage visant à imiter les écosystèmes naturels (recyclage de la matière organique via la litière des arbres, ombrage, etc.) tout en permettant la production de produits forestiers (ligneux et non-ligneux) annexes mais essentiels aux exploitations agricoles (renforcement de la sécurité alimentaire, revenu, bois de chauffe, construction, médecine traditionnelle, etc.). Ce concept relativement jeune, se développe en Afrique (Garrity *et al.*, 2010) et en Inde (Swaminathan, 1996). L'**agriculture à haute valeur environnementale** (Griffon, 2007 ; Eastes, 2010) s'appuie sur un mécanisme de certification des produits agricoles selon les performances environnementales des exploitations agricoles qui les produisent (ex. Haute Valeur Environnementale, HVE). Cette certification atteste que la biodiversité est protégée sur l'exploitation et que les pratiques agricoles ont des impacts limités sur l'environnement. Enfin, la **permaculture** (Mollison, 1990) s'appuie sur l'analyse de l'efficacité et de la productivité des écosystèmes naturels pour identifier des principes universels et concevoir des nouveaux systèmes de production durables, économes en énergie (fossile et liée au travail), respectueux des êtres vivants, avec le minimum d'intervention sur « la nature ». Elle s'appuie sur une combinaison entre des systèmes annuels et pérennes.

Enfin, le 4^e type de modèle agricole affiché, vise à sauvegarder la biodiversité. L'**écoagriculture** (McNeely *et al.*, 2003) vise à concilier, dans les espaces agricoles des objectifs de production agricole et de préservation de la biodiversité considérant les agriculteurs comme des producteurs et des gestionnaires de l'environnement et l'échelle paysage centrale.

1.2. L'AGROECOLOGIE

Pour faire face à la crise environnementale en cours, l'agriculture doit concevoir des systèmes de cultures et d'élevage répondant aux nouvelles exigences des agriculteurs et de la société civile en s'appuyant sur les processus et les fonctionnalités écologiques qui permettent de lutter contre les bio-agresseurs, de réduire les nuisances, de mieux valoriser les ressources rares, comme l'eau, ou encore d'améliorer les services écologiques (stockage du carbone, diversité biologique, prévention des catastrophes dites naturelles, etc.).

Face à la diversité d'approche, les institutions internationales, comme la FAO, reprennent le concept d'agroécologie. En effet, la FAO appelle à un changement profond des systèmes alimentaires (production, organisation de filière et consommation), vers des systèmes alimentaires durables offrant une alimentation équilibrée et nutritive, des services écosystémiques et une meilleure résilience face au climat, à travers la promotion de l'agroécologie (FAO, 2018). L'agroécologie, qui associe des savoirs traditionnels et

scientifiques, des approches écologiques et sociales, et prend en compte les multiples interactions qui existent entre plantes, animaux et environnement est vue comme une voie pour atteindre une « *révolution doublement verte* » de la production agricole. L'agroécologie doit permettre de réintroduire de la biodiversité dans les systèmes de production agricole, de restaurer une mosaïque paysagère diversifiée par une diversification des cultures et l'allongement des rotations et l'implantation de cultures associées.

1.2.1. Histoire et évolution du concept d'agroécologie

L'agroécologie est un concept dont la définition demeure polysémique (Stassart *et al.*, 2012). Il n'existe pas une seule manière de définir l'agroécologie et cela peut s'expliquer à travers son historique. Wezel *et al.* (2009) considèrent le développement de l'agroécologie suivant trois angles de vue : agroécologie comme discipline scientifique, comme mouvement social et politique, et agroécologie comme pratique agricole.

1.2.1.1. Agroécologie comme « discipline scientifique »

Les premiers développements de ce concept étaient uniquement sous forme de discipline scientifique (sciences de la vie) et l'objet d'étude se limitait à la parcelle.

Le concept a été évoqué pour la première fois par Bensin, un agronome dans les années 1930, pour désigner l'utilisation de méthodes de l'écologie au service de la recherche sur les plantes commerciales (cité par Wezel *et al.*, 2009).

Depuis les années 1930, la définition de l'agroécologie et son échelle d'analyse ont considérablement évolué. On est passé de l'échelle des variétés et des interactions plante-parasite (Bensin, 1925) à l'échelle de la parcelle et du système de culture (Azzi 1956 cité par Wezel *et al.*, 2009) à l'animal plus tardivement (Dumont *et al.*, 2013, 2014 ; Thomas *et al.*, 2014). Un premier livre, intitulé « *agroécologie* » a étudié des différents compartiments de l'agroécosystème (sol, plante, etc.) et leurs interactions, ainsi que l'impact de la gestion humaine des activités agricoles sur ces compartiments (Tischler, 1965 cité par Wezel *et al.*, 2009). Cette approche combine écologie et agronomie, avec une analyse des interactions entre éléments biologiques et une analyse des pratiques agricoles. Dans les années 1970, l'agroécologie s'intéresse à l'exploitation agricole (agroécosystème) (Odum, 1969), puis à l'échelle plus large du paysage, du territoire voire du système alimentaire.

Les approches ont également évolué passant des sciences biotechniques (agronomie, écologie) à une approche transdisciplinaire incluant les sciences sociales (Francis *et al.*, 2003, Altieri, 2008). L'agroécologie a une vision multidimensionnelle englobant des dimensions environnementales, sociales, économiques et éthiques (Wezel *et al.*, 2009 ; Lavorel et Boulet,

2010). Le changement d'échelle de la parcelle au territoire et système alimentaire oblige une analyse multidimensionnelle et la prise en compte de la pluralité des acteurs (citoyens, consommateurs et acteurs sociaux) et des relations entre sciences et sociétés.

Pour illustrer la double évolution de la définition, Schaller (2013) a comparé la définition de l'agronome français Hénin des années 1960, « *l'écologie appliquée à la production végétale et à la gestion des terres agricoles* » (Hénin, 1967), à celle de Francis en 2003, « *l'étude intégrée de l'écologie du système alimentaire dans son ensemble, comprenant ses dimensions écologiques, économiques et sociales, ou plus simplement l'écologie des systèmes alimentaires* » (Francis et al., 2003).

L'agroécologie en tant que discipline scientifique couvre trois champs d'action : les systèmes productifs au sens strict, les systèmes alimentaires et l'étude des rapports entre production alimentaire et société au sens large (Stassart et al., 2012). Développés séparément initialement, ces trois champs d'action doivent être abordés ensemble pour concevoir et analyser des systèmes agroécologiques. La nouvelle définition proposée par INRA et CIRAD (2009) : « *l'agroécologie est l'application de l'écologie à l'étude, à la conception et à la gestion des systèmes agro-alimentaires [...] elle n'est définie ni exclusivement par des disciplines scientifiques, ni exclusivement par des mouvements sociaux, ni exclusivement par des pratiques. Elle est appelée à devenir un concept fédérateur d'actions, intermédiaire entre ces trois dimensions* ».

1.2.1.2. Agroécologie comme « mouvement social et politique »

L'agroécologie se caractérise également par une dimension socio-économique et culturelle. Elle permet de créer un mouvement de transformation des modes de gestion des écosystèmes et de l'environnement économique de la production dans une dynamique participative. Les mouvements sociaux en lien avec l'agroécologie ont pour but le rejet des modes de production agricoles basés sur la révolution verte, et promeuvent la souveraineté et la sécurité alimentaire du développement rural, l'autonomie des agriculteurs et une agriculture respectueuse de l'environnement. Ces mouvements portés par la société civile développent une approche explicitement politique de l'agroécologie. Cette approche politique peut être illustrée par la *déclaration de Nyéléni* lors du Forum International sur l'Agroécologie organisé en 2015 au Mali « *L'agroécologie est politique ; elle nous demande de remettre en cause et de transformer les structures de pouvoir de nos sociétés. Nous devons placer le contrôle des semences, de la biodiversité, des terres et territoires, de l'eau, des savoirs, de la culture, des biens communs et des espaces communautaires entre les mains de celles et ceux qui nourrissent le monde* » (Anderson et al., 2015).

1.2.1.3. Agroécologie comme « pratiques agricoles »

L'agroécologie comme pratiques agricoles peut globalement être définie comme un ensemble cohérent permettant de concevoir des systèmes agricoles qui s'appuient sur les fonctionnalités offertes par les écosystèmes, en réduisant les pressions sur l'environnement et en préservant les ressources naturelles. Une diversité de pratiques agroécologiques est développée par des paysans ou proposée par la recherche. Il s'agit de l'agriculture de conservation, l'agroforesterie, l'agriculture biologique, l'intégration agriculture-élevage, la permaculture, la gestion biologique des bio-agresseurs, ou le système de riziculture intensive (Schaller, 2013). L'agroécologie, en tant qu'ensemble de pratiques et de principes innovants, consiste à obtenir les arrangements sociotechniques les plus performants dans des environnements hétérogènes. La difficulté majeure est rencontrée lors de l'identification des combinaisons pertinentes de pratiques permettant de mettre en œuvre les principes de l'agroécologie dans un contexte donné. En effet, une adaptation des pratiques est nécessaire en tenant compte des interactions pratiques-composantes du système. Ce n'est pas la somme de pratiques aléatoires qui permet la création d'un système mais une combinaison de pratiques cohérentes (Schaller, 2013).

1.2.2. Les principes de l'agroécologie

Malgré la diversité d'auteurs, de définitions et d'évolutions, les principes de l'agroécologie restent les mêmes. Il s'agit de réduire (voire de supprimer) l'usage excessif d'intrants classiques en se basant sur le renforcement des interactions qui existent entre les différentes composantes d'un écosystème afin d'atténuer l'impact sanitaire et environnemental de l'activité agricole.

Les deux grands piliers sur lesquels reposent les fondements de l'écologie sont : l'accroissement de la biodiversité et le renforcement des régulations biologiques qui confèrent au système plusieurs propriétés l'aidant à améliorer sa durabilité.

De ces piliers, découlent cinq principes d'orientation permettant de concevoir des systèmes agroécologiques (Altieri, 1995) : (i) optimiser et équilibrer les flux de nutriments ; (ii) minimiser l'usage des ressources externes non renouvelables (engrais, pesticides, carburant) ; (iii) maximiser l'usage des ressources renouvelables (solaire, organique, hydrique) ; (iv) favoriser la diversité génétique ; et enfin (v) promouvoir les processus et les services écologiques (Reijntjes *et al.*, 1992).

Ces cinq principes définissant les fonctions écologiques à remplir par les agroécosystèmes visent la valorisation des processus écologiques pour concevoir des systèmes agricoles durables (Altieri et Nicholls, 2005) : (i) renforcer la fonction « immunitaire » des pratiques agricoles, telle que la lutte biologique ; (ii) diminuer la toxicité des pratiques sur l'environnement par la réduction ou l'élimination des produits phytosanitaires ; (iii) optimiser les fonctions

métaboliques des sols (décomposition de la matière organique, recyclage des nutriments) ; (iv) équilibrer les systèmes de régulation (recyclage des nutriments, équilibre hydrique, flux d'énergies, dynamique des populations) ; et (v) améliorer la conservation et la régénération des sols, de l'eau et de la biodiversité.

1.2.3. Transition agroécologique

Les systèmes de production actuels, qu'ils soient à faible ou forte consommation d'intrants, doivent évoluer pour respecter les principes de l'agroécologie pour une durabilité certaine de l'agriculture. Il est utopique d'espérer un changement brusque des systèmes agricoles qui évoluent sur de longues périodes. Plusieurs auteurs s'accordent sur la nécessité de s'engager dans une période de transition, mais sans préciser la durée de cette transition (Berton *et al.*, 2013). Cette période de transition doit permettre de relever les défis d'ordre technique, humain, socio-économique, et institutionnel (Trabelsi, 2017) auxquels sont confrontés les agriculteurs lors de tout changement dans les systèmes de production. La période de transition doit permettre aux acteurs de progressivement maîtriser le nouveau système de production et de valoriser les connaissances scientifiques mais aussi locales, produites par les agriculteurs (Dugué, 2013).

Selon Eastes (2010), les objectifs de production des pays dit « du Nord » sont de produire « mieux » et « différemment » (sainement) alors que dans les pays dit « du Sud » la question est avant tout de produire « plus » en faisant face aux divers aléas, sans hypothéquer la capacité à produire. Les systèmes de production à forte consommation d'intrants doivent se saisir de cette période de transition pour maintenir le niveau de performance actuel tout en respectant les principes de l'agroécologie. Les systèmes à bas niveau d'intrants doivent se saisir de cette phase de transition pour mobiliser les processus écologiques, améliorer la production actuelle et optimiser l'usage des intrants. Cette transition doit donc être adaptée à chaque système. Le rapport de l'ICSU-CASAFA (1991) cité par Hulse (2008) abondait dans le même sens : « *Il n'est d'aucune pertinence de proposer des systèmes de production censés s'appliquer de manière durable dans tous les milieux écologiques, dans toutes les régions et dans toutes les sociétés. Aucun système spécifique ne peut convenir durablement à toutes les situations (...)* ». Il serait donc irréaliste de penser aborder la protection de l'environnement sous le même angle pour des régions à niveau d'adoption des technologies différents.

Les freins à l'adoption des systèmes agroécologiques sont justement l'absence de recommandations techniques normatives applicables à tous les systèmes (doses d'engrais, variété, itinéraire technique, etc.) comme dans le cas de l'agriculture conventionnelle. L'agroécologie nécessite de la part de l'agriculteur l'acquisition de nouvelles compétences et connaissances techniques, appuyé par un encadrement technique adapté, afin de gérer les

systèmes de production selon les observations faites au-delà de l'application d'un itinéraire préétablie (Trabelsi, 2017). De plus, en Afrique de l'Ouest, les freins à l'adoption de ces pratiques sont aussi l'augmentation de la charge en travail qu'elles impliquent, la prise de risque qu'elles représentent pour l'agriculteur et le faible niveau de rentabilité à court terme (Dugué, 2013). Il paraît nécessaire de concilier enjeux socio-économiques et environnementaux lors de la conception des nouveaux systèmes de production. « *Les agriculteurs n'ont pas une opinion toujours négative des innovations classiques ou agroécologiques, mais pour qu'ils y adhèrent il faut qu'ils y trouvent un intérêt* » (Dugué, 2013). La recherche doit évaluer le coût d'opportunité de chaque innovation pour aider la prise de décision des agriculteurs (Perret, 2011). Ces évaluations doivent surpasser l'analyse traditionnelle coûts/bénéfices pour inclure les risques techniques (ex. pullulation non prévue d'un déprédateur) et économiques associés à l'adoption d'une nouvelle technologie, la temporalité du retour sur investissement, ainsi que le temps de travail et sa pénibilité (Dugué *et al.*, 2013 ; Schaller, 2013). Le système recherche-formation-développement et les politiques publiques ont aussi un rôle à jouer pour accompagner cette transition en proposant des outils incitatifs pour les individus, les collectifs et les filières (Schaller, 2013).

1.3. LES SYSTEMES MIXTES DE POLYCULTURE-ELEVAGE

Les systèmes mixtes sont les formes prédominantes de l'agriculture dans le monde (Herrero *et al.*, 2010). Les systèmes mixtes de polyculture-élevage pratiquent sur une même exploitation des activités agricoles et des activités d'élevage (Schiere et Kater, 2001). Les deux ateliers peuvent être menés parallèlement et indépendamment l'un de l'autre, ou au contraire, impliquer des échanges de matières, de travail ou de financements entre les deux ateliers (Ryschawy *et al.*, 2014).

1.3.1. Les systèmes mixtes de polyculture-élevage

On définit les systèmes mixtes comme des systèmes agricoles, régis par des ménages où des entreprises, où les cultures et l'élevage forment à eux deux les composantes d'un système agricole unique (Schiere et Kater, 2001). D'autres auteurs définissent les systèmes mixtes comme des systèmes où plus de 10% de la matière sèche fournie aux animaux provient de sous-produits végétaux ou plus de 10% de la valeur totale de la production du système provient d'activités non liées à l'élevage (Seré et Steinfeld, 1995).

Les systèmes mixtes sont largement répandus particulièrement en Afrique subsaharienne, en Asie du Sud-Est et en Amérique Latine (Schiere *et al.*, 2002 ; Devendra et Thomas, 2002). Herrero *et al.* (2010) estiment, que les deux tiers de la population mondiale vivent dans des systèmes de polyculture-élevage et que la croissance attendue de la population se fera dans

les zones où ces systèmes sont dominants, les plaçant au centre des attentions concernant les évolutions à construire des systèmes de production agricole. De plus, ces systèmes de production sont à l'origine de la moitié de la production céréalière mondiale (41 % du maïs, 86 % du riz, 66 % du sorgho, et 74 % du mil) (Herrero *et al.*, 2010), de la majorité des produits animaux (60 % de la viande, 75 % du lait) (Herrero *et al.*, 2010) et participent largement à l'emploi en zone rurale, dans les exploitations agricoles mais aussi sur les chaînes de valeurs en amont et en aval. Ils estiment qu'un milliard de personnes les plus pauvres du monde (vivant avec moins de 1 USD/j) sont nourries par des centaines de millions d'exploitations mixtes de polyculture-élevage de petite taille. Il s'agit d'agriculteurs cultivant plusieurs cultures sur moins de 2 ha et ayant 1 à 2 vaches et des petits éleveurs avec moins de cinq grands ruminants. Les systèmes mixtes de polyculture-élevage sont au centre des défis que l'agriculture doit relever.

Dans les pays du sud, le modèle d'exploitation de polyculture-élevage apparaît comme la voie d'intensification de la production agricole, dans un contexte de faible accès aux capitaux, aux crédits et aux intrants. Ce modèle permettrait la mise en place de pratiques agronomiques plus respectueuses de l'environnement et apporterait une flexibilité accrue des systèmes, dans un contexte de raréfaction de l'énergie et de risques climatiques (Figure 2). Dans les pays du Nord, ces exploitations mixtes de polyculture-élevage sont aujourd'hui marginalisées, avec une concentration et une spécialisation poussée des exploitations et des territoires et une dissociation des activités agricoles et d'élevage à ces deux échelles, suite aux incitations de la Politique Agricole Commune en Europe mais aussi largement des marchés et de la raréfaction de la main-d'œuvre agricole (Ryschawy *et al.*, 2014), et plus généralement d'un verrouillage sociotechnique des systèmes de production (Lamine, 2012).

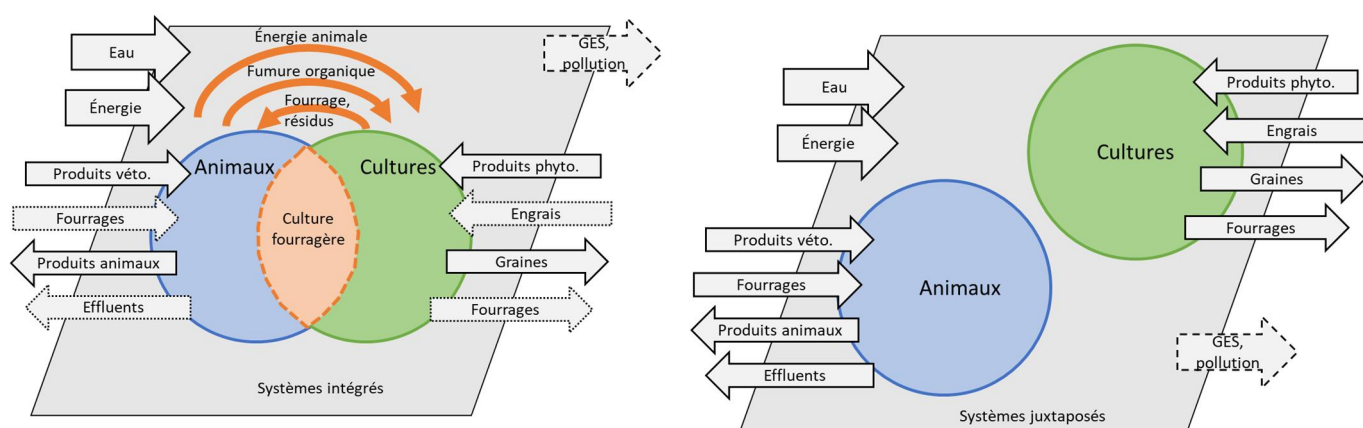


Figure 2. Système mixte polyculture-élevage intégré (d'après Moraine *et al.*, 2014) versus système juxtaposé

1.3.2. Les systèmes intégrés culture-élevage et pisciculture

Un système mixte spécifique, largement développé dans les systèmes de production asiatiques (Chine, Vietnam, etc.), intègre une composante piscicole à ces systèmes polyculture-élevage. Ces systèmes sont diversifiés par l'intégration de cultures, de légumes, du bétail, d'arbres et de poissons. L'objectif recherché dans le développement de ces systèmes est une meilleure stabilité de la production malgré l'incertitude des marchés et du climat, une efficacité dans l'utilisation des ressources et une meilleure conservation de l'environnement (Guo, 2001).

En Asie du Sud-Est, ces systèmes de production intégrant culture-élevage et pisciculture sont largement développés (Yang *et al.*, 2003). Appelé système VAC au Vietnam, pour “*Vườn - Ao - Chuồng*” en vietnamien (jardin, étang piscicole et élevage), ces systèmes permettent un recyclage important de biomasses et de nutriments au sein des exploitations (Figure 3). Les déjections des animaux, mais aussi une partie de la production agricole servent à alimenter l'étang piscicole. Les eaux et dépôts des étangs servent de fertilisant aux systèmes agricoles avec une partie des déjections animales. Enfin, une partie de la production agricole est utilisée pour alimenter étang de pisciculture et élevage (Little et Edwards, 2005a ; Simelton *et al.*, 2017).

Les interactions entre l'aquaculture et l'élevage concernent le recyclage des nutriments à travers l'usage des déchets de l'élevage (fumier, urine et aliments) pour alimenter les poissons. En retour, l'aquaculture peut procurer des aliments pour les ruminants et monogastriques, comme certaines plantes aquatiques (lentilles d'eau et fougère aquatique *Azolla*) ou certains invertébrés (mollusques et crustacés). De plus, l'eau utilisée en pisciculture peut être utile pour abreuver ou laver le bétail et pour rafraîchir les étables. Ces systèmes sont cependant aussi en concurrence pour l'utilisation de certains intrants (son de riz, tourteaux, fourrage). La raréfaction de certains intrants représente un frein au développement de ces systèmes intégrés (Little et Edwards, 2005b).

Les interactions entre l'agriculture, l'aquaculture et le l'élevage se traduisent généralement par une irrigation des cultures à partir de l'eau d'étangs. Les éléments nutritifs contenus dans l'eau d'élevage ainsi que les sédiments sont utilisés pour produire des cultures arables destinées au bétail car cette eau est plus riche en substances nutritives que l'eau de puits et contient même des algues bleu-vert qui fixent le nitrogène et améliorent la fertilité des sols (Little et Edwards, 2005b).

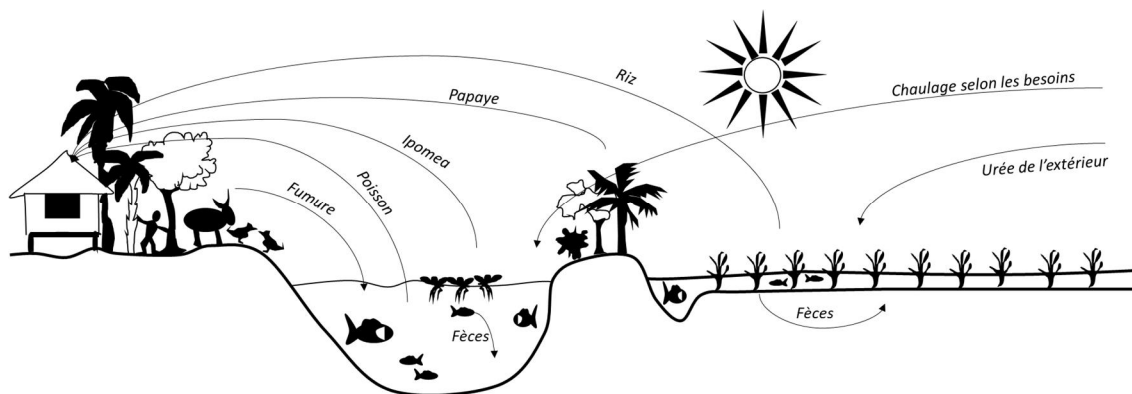


Figure 3. Systèmes intégrés culture-élevage et pisciculture (à partir de Ali, 2001)

1.4. L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE EN AFRIQUE DE L'OUEST

1.4.1. Histoire de l'intégration agriculture-élevage

Autrefois, en Afrique de l'Ouest, l'agriculture et l'élevage étaient deux activités séparées, conduites par des populations distinctes sur des espaces plus ou moins disjoints (Lhoste *et al.*, 2010). Les agriculteurs ne possédaient pas ou peu de bétail et les éleveurs pratiquaient peu l'agriculture (Powell *et al.*, 2004 ; Dugué *et al.*, 2004, 2013 ; Lhoste *et al.*, 2010). Toutefois, avant les années 1950, des systèmes agropastoraux combinant productions végétales et animales existaient dans les zones à très fortes densités de population (50 à 80 hab.km⁻²), avec le cas du pays Serer au Sénégal, du pays Tupuri au Nord Cameroun et les Hautes-Terres à Madagascar (Dugué *et al.*, 2013). Les échanges entre agriculture et élevage se faisaient entre les composantes culture et élevage d'une même exploitation mais aussi entre éleveurs et agriculteurs à l'échelle des territoires. La promotion du modèle de système de production basé en grande partie sur l'intégration agriculture-élevage au sein d'une même exploitation agricole s'inspirait très clairement de celui de l'agriculture française et européenne du XIX^e siècle et de la première moitié du XX^e siècle basé sur la révolution fourragère, l'abandon de la jachère et le début de la mécanisation par des agronomes (Dugué et Dongmo, 2004).

Toutefois, une campagne d'introduction de la traction animale dans les systèmes agricoles de nombreux pays dès les années 1950 visait à améliorer la productivité de la terre et du travail et la production des cultures industrielles d'intérêt pour les pays du Nord (coton, arachide). Dès leur indépendance, les Etats africains portent leur intérêt sur cette technique, via des actions d'accompagnement agricole pour développer les productions agricoles destinées à l'exportation. L'équipement en traction animale progresse fortement dans les exploitations agricoles dès les années 1960 avec un appui pour l'acquisition d'animaux de trait et d'équipement pour le labour (Lhoste *et al.*, 2010 ; Dugué *et al.*, 2013). L'équipement en traction se poursuit dans les années 1970 avec les sècheresses (Allafort, 1983 ; Havard *et al.*, 2004).

Des actions d'accompagnement ont été mises en place pour améliorer l'entretien des bœufs de trait dans les fermes et favoriser l'entretien de la fertilité des sols. Les paysans ont ainsi été encouragés à produire des fourrages et à collecter et utiliser les fumiers produits (Berger *et al.*, 1987).

Ces actions d'accompagnement ont été développées selon trois niveaux.

- (i) En station, le *volet expérimental* a permis à des chercheurs de mettre au point des normes techniques (Hamon, 1972) autour de la production de fourrage, de fumier, des ateliers d'entretien des animaux de trait etc. Centrés sur des aspects techniques, les chercheurs ne se sont pas intéressés à l'analyse des logiques et des représentations des acteurs (Boudet, 1961 ; Landais et Lhoste, 1990). Puis, ils ont rapidement fait face à des difficultés d'adaptation des techniques proposées. La recherche biotechnique initialement privilégiée s'est accompagnée d'une très faible adoption des innovations techniques (cultures fourragère, production de fumier, attelage des femelles (Bernardet, 1984).
- (ii) Pour pallier cette faible adoption, l'intérêt s'est progressivement porté sur *l'exploitation agricole* en tant que centre d'arbitrage et de prise de décision, notamment pour caractériser les modalités des pratiques mises en œuvre par les acteurs en matière d'intégration agriculture-élevage (Landais, 1985 ; Landais et Lhoste, 1990 ; D'Aquino *et al.*, 1998). Les analyses ont porté sur les déterminants, les modalités et les effets des pratiques (traction animale, fourrage, fumier) sur les systèmes de production. Elles ont permis de comprendre le faible engouement des producteurs pour ces techniques et les principaux freins à leur développement. Les causes d'échec des cultures fourragères et des étables fumières étaient : une sécurisation foncière insuffisante, un sous-développement des équipements de transport, la prédominance des jachères dans les zones peu peuplées et la pratique de la vaine pâture (Vall *et al.*, 2004 ; Lhoste *et al.*, 2010).
- (iii) Enfin, l'analyse de l'intégration agriculture-élevage au *niveau territorial* a été évoquée plusieurs années plus tard (Landais, 1985) en s'intéressant aux modes d'occupation et de valorisation des espaces et des ressources et aux conflits entre les différentes communautés ou groupes d'usagers (Augusseau *et al.*, 2004 ; Meaux *et al.*, 2004 ; Gautier *et al.*, 2005). L'intégration agriculture-élevage a finalement évolué vers des formes éloignées des prévisions initiales (Dugué et Dongmo, 2004) avec une mise en œuvre au niveau des exploitations agricoles mais aussi au niveau des territoires.

1.4.2. Différents niveaux d'analyse de l'intégration agriculture-élevage

Les pratiques d'intégration agriculture-élevage sont un ensemble de pratiques regroupant la production de fourrage et la valorisation des résidus de récolte pour l'affouragement du bétail, la production de fumure organique favorable à l'entretien de la fertilité du sol et la traction animale pour le système de culture, mais aussi les transferts de fertilité (*saltus – ager* ou *ager - ager*) et la gestion collective des jachères et des pâturages à l'échelle du territoire (Dugué et al., 2004).

Les relations entre les activités agricoles et d'élevage se lisent ainsi à deux niveaux. Des relations d'ordre biotechnique sont mises en œuvre au niveau de **l'exploitation agricole** par des flux d'énergie (traction animale), de matière (coproduits de l'agriculture et de l'élevage) et de biens (capitalisation/déstockage). Elles représentent des pratiques individuelles. Au **niveau du territoire**, des relations d'échanges et de conflits se mettent en place entre les éleveurs et les agriculteurs ou entre propriétaires d'animaux et cultivateurs : location d'animaux et gardiennage, droit de vaine pâture, vente de fumure, droit de passage mais aussi dégâts des animaux sur les cultures, obturation des pistes à bétail par des cultures, etc. (Vall et al., 2006b). A cette échelle, les pratiques individuelles s'articulent aux pratiques collectives, dans le cadre des règles et du droit en vigueur (Dongmo, 2009). La recherche d'une meilleure complémentarité entre activités agricoles et d'élevage, doit tenir compte des différentes échelles des exploitations agricoles et des territoires, mais aussi régional voir global (Peyraud et al., 2012) (Figure 4).

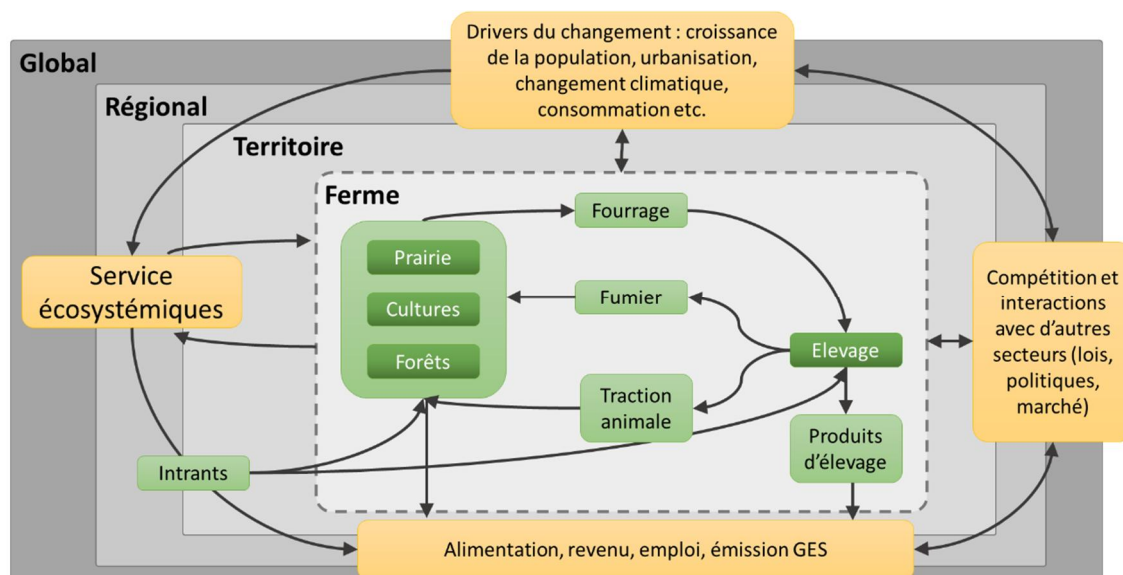


Figure 4. Principales interactions dans les systèmes mixtes polyculture-élevage (d'après Herrero et al., 2010)

1.4.2.1. Intégration agriculture-élevage à l'échelle de l'exploitation agricole

A l'échelle de l'exploitation agricole, les trois piliers biotechniques sur lesquels repose l'intégration agriculture-élevage sont l'énergie produite par les animaux pour la traction animale, l'alimentation des animaux à partir des cultures fourragères et du stockage de résidus de culture et la production de la fumure organique (Landais et Lhoste, 1990). Ces échanges biotechniques s'accompagnent d'échanges socioéconomiques (Lhoste, 2004b).

La traction animale

Dès les années 1990, dans les pays en développement, les animaux de trait fournissaient 10% de l'énergie agricole. Le travail manuel des paysans fournissait 89% de l'énergie agricole alors que seulement 1% l'était par la motorisation (Le Thiec, 1996). La FAO estimait en 2001 qu'en Afrique Subsaharienne et centrale, seulement 4% des terres cultivées étaient travaillées par tracteur, 22% avec l'énergie animale et que 70% des terres agricoles restaient préparées par un travail manuel (FAO 2001 cité par Havard et Side, 2016).

Les effectifs d'animaux de trait dans 11 pays d'Afrique francophone (zone CFA et Guinée) sont passés de 339 000 têtes en majorité des bovins et des ânes en 1960 à plus de 1,8 millions en 1995, et pour les mêmes pays et la même période, le matériel de traction animale est passé de 345 000 équipements à 2,3 millions (Havard *et al.*, 1998). La progression a cependant ralenti avec une stagnation dans l'amélioration du taux d'équipement en traction animale des exploitations agricoles (Havard et Side, 2016). Au Burkina Faso, les types d'attelages dominants restent la paire de zébus pour les travaux de culture attelée et l'âne attelé seul pour l'attelage de charrettes (Vall *et al.*, 2012).

La traction animale permet de combiner le travail humain et animal et par conséquent, de réduire la pénibilité du travail manuel. Elle permet l'exécution de certaines activités agricoles (labours, semis, sarclage, buttage), le transport des biens (intrants agricoles, fumier, fourrages, récoltes) (Pingali *et al.*, 1983 ; Vall *et al.*, 2002 ; Lhoste, 2004a), l'exhaure de l'eau et le battage des céréales (Dongmo, 2009). Elle permet aussi de maîtriser les adventices dans les systèmes de culture où la jachère qui jouait ce rôle a disparu (Vall *et al.*, 2004 ; Dongmo, 2009). Mémento Agronome (1991) et Vall et Bayala (2007) rapportent que deux hommes en s'appuyant sur la traction animale peuvent entretenir 5 hectares de culture au lieu d'un manuellement. La traction animale s'est accompagnée cependant d'un accroissement de l'emprise agricole dans les zones de culture de coton et d'arachide (Havard *et al.*, 2004 ; Vall *et al.*, 2006b) avec une rapide extension des surfaces mise en culture. La traction animale est déterminante pour la production agricole, la sécurité alimentaire, la génération de richesse et la réduction de la pauvreté des petites exploitations (Lhoste, 2004a).

L'affouragement des animaux

La valorisation de résidus de culture pour l'affouragement des animaux se fait soit sur pieds au champ lors de la vaine pâture après les récoltes, soit à partir de résidus stockés puis distribués à l'étable en saison sèche lors de la période de pénurie (Vall *et al.*, 2006a ; Dongmo, 2009).

Les quantités de résidus de culture stockées et distribuées aux animaux en saison sèche restent inférieures aux recommandations, particulièrement dans les exploitations disposant d'un grand troupeau ou en l'absence d'ateliers d'embouches ou laitiers permettant de générer des revenus et rentabiliser l'effort consenti pour collecter plus de biomasse (Okike *et al.*, 2005 ; Basu et Scholten, 2012).

Pour couvrir les besoins fourragers du troupeau, la mobilité des animaux permet un prélèvement de ressources sur les parcours (parcours naturels, sous forêt, bord de route, ou jachère) ou directement sur les champs après les récoltes (Vall et Diallo, 2009). Elle permet ainsi de pallier les insuffisances des fourrages stockés (Saleem, 1998 ; Okike *et al.*, 2005).

Pour faire face à une limite de main d'œuvre ou des entraves à la mobilité animale, certains éleveurs cherchent à réduire la mobilité de leur troupeau en augmentant les quantités de fourrages produits et stockés ou en réduisant l'effectif de leur troupeau (Sempore *et al.*, 2009). Cependant, selon la perception des éleveurs, l'accumulation d'animaux est une marque de prestige social et de richesse, une forme d'épargne, et un gage de sécurité (décapitalisation en cas de besoins). De plus, la mobilité animale favorise les échanges entre producteurs pour la vente d'animaux et de lait, et les contrats de fumure organique (Smaling et Dixon, 2006). La réduction de la mobilité pourrait avoir des implications sur les autres producteurs et l'ensemble des flux de biomasse à l'échelle des territoires (Sempore *et al.*, 2009 ; Diarisso *et al.*, 2015).

Dans les années 1990, (Landais et Lhoste, 1990) expliquaient que la non-adoption de la culture fourragère proposée était due à la faible disponibilité de la main d'œuvre supplémentaire nécessaire, mais aussi, parce qu'à l'époque, les fourrages restaient disponibles dans le milieu naturel. Dans les années 2000, quelques parcelles de cultures fourragères commençaient à être visibles dans l'Ouest du Burkina Faso (Province du Tuy). Moins de 15% des paysans déclaraient avoir cultivé au moins une fois du *Mucuna sp.* comme fourrage (Vall *et al.*, 2017). Les cultures fourragères les plus utilisées sont à usage multiple avec surtout des légumineuses (*Stylosanthes hamata*, *Stylosanthes guianensis*, *Mucuna pruriens*, *Cajanus cajan*, *Desmodium distortum*, *Dolichos lablab*) mais aussi des graminées (*Brachiaria ruziziensis*) (Dugué *et al.*, 2004). Les avantages multiples sont fourrager (les fanes et sous-produit), alimentaire (grain pour l'homme) ou fertilisante (Herrero *et al.*, 2010 ; Coulibaly *et al.*, 2012a). Ces cultures fourragères à usage multiple nécessitent peu de travail et d'intrants, commencent à être adoptées dans la zone cotonnière (Vall *et al.*, 2011).

La fumure organique

En Afrique de l'Ouest, les effets favorables des apports organiques sur les sols agricoles ne sont plus à démontrer (Ganry, 1998) : apport en nutriments, accroissement de la teneur en carbone des sols, amélioration de leur rétention en eau, de leur capacité d'échange cationique et de leur structure, améliorant leur résilience, augmentant leur stabilité (Lhoste, 2004b ; Penot *et al.* 2014), et stimulant la vie biologique qu'ils hébergent (Lalande *et al.*, 2000 ; Peyraud *et al.*, 2012). L'épandage de fumure organique sur les sols agricoles permet de réduire les achats d'engrais minéraux par les exploitations de polyculture-élevage et de préserver l'azote dans le système de production. L'accroissement de la teneur en carbone des sols par épandage de fumure organique dépend de la qualité des fumures épandues. La proportion de carbone apportée qui se retrouve sous forme stable dans le sol varie de 10 à 30% pour les effluents liquides et de 20 à 50% pour les effluents solides (Morvan *et al.*, 2006 ; Peltre *et al.*, 2012).

Il existe deux modes de valorisation des déjections animales avant la mise en culture des parcelles. Le parcage direct du troupeau sur les terres agricoles avant la mise en culture permet un dépôt direct des fèces mais aussi des urines sur les terres sélectionnées (Powell *et al.*, 2004). Lors de la stabulation des animaux au parc ou à l'étable, la collecte des déjections animales, des refus de fourrage voire de litière ou d'ordures ménagères, leur transformation en tas ou en fosse et leur épandage sur terres agricoles avant le labour est l'autre forme d'utilisation des déjections animales pour fertiliser les sols.

La recherche en milieu contrôlé et en milieu paysan a développé des techniques de production de fumure organique en mobilisant les biomasses disponibles dans les exploitations (déjections animales, résidus de cultures) : fumier issu des étables fumières (Hamon, 1972, Blanchard et Vall, 2010), poudrette de parc issue des parcs simples, fumier de parcs d'hivernage ou amélioré (Berger, 1991) et le compostage (Blanchard *et al.*, 2012 ; Zoungrana-Ouédraogo et Traoré, 2016) ; (Berger, 1996b ; Ganry, 1998).

Dans les années 1980, ces techniques n'avaient pas été largement adoptées en zone cotonnière ouest-africaines par les exploitations qui faisaient face à une faible disponibilité des résidus de récolte et à des difficultés de transport des biomasses avec de grandes distances entre les champs et les lieux de production de fumure et un faible niveau d'équipement en charrettes (Schleich, 1986). Aujourd'hui, la production et l'utilisation de fumure organique est une pratique courante dans les exploitations d'Afrique de l'Ouest, principalement autour des déjections animales et des ordures ménagères. Dans la Province du Tuy (Ouest du Burkina Faso), 65% des exploitations produisent de la terre de parc, 29% valorisent les ordures ménagères (Vall *et al.*, 2011). Dans les années 2000, 33% des exploitations y étaient équipées d'au moins une fosse dans la concession contre seulement 7% pour les fosses au champ. Le parc amélioré, *stricto sensu*, avec de la litière appliquée sous les animaux stabulés restaient peu adoptés (Vall, 2009). Les exploitations sont mieux équipées en moyens de transport

(charrettes, voire transport motorisé via des triporteur) et l'augmentation du prix des engrais minéraux a milité en faveur de l'amélioration de la production de fumure organique (Tingueri, 2015 ; Blanchard *et al.*, 2017).

La reconnaissance des savoirs locaux des paysans sur les fumures organiques au Mali-Sud (Blanchard *et al.* 2013) a permis d'identifier les types de fumures qui ont du sens pour les paysans (une diversité de déjections animales, les ordures domestiques, la fumure de fosse, le compost et les boues des fosses septiques), les variables qui les caractérisent selon le point de vue des acteurs (emplacement du lieu de production, composants utilisés et disponibilité, technicité et travail à investir, intensité et durée de l'effet, risques liés à leur usage) et de reconnaître les règles de gestion de ces fumures (localisation de la production, temporalité de la production et de l'usage) (Blanchard et Vall, 2010 ; Vall *et al.*, 2010). La Figure 5 illustre la diversité des modes de production mise en œuvre dans les exploitations de polyculture-élevage de la zone cotonnière et leur répartition dans l'espace.

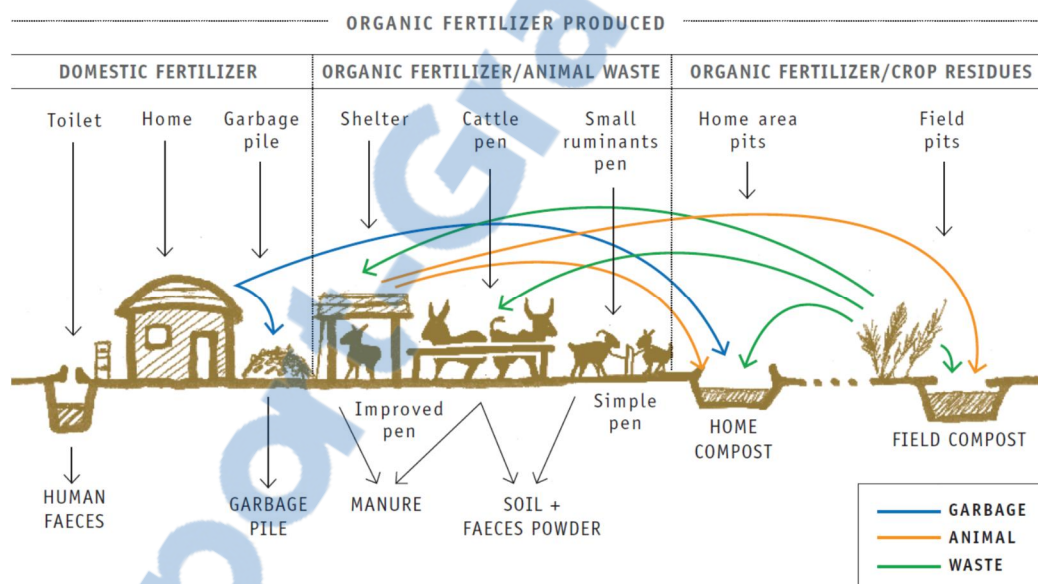


Figure 5. Diversité des modes de production de fumure organique au Mali-Sud (d'après Blanchard *et al.*, 2013)

Les doses de fumure organique épandue sur les parcelles cultivées ne permettent pas d'atteindre les doses recommandées ($2t. ha^{-1}.an^{-1}$) (Berger *et al.*, 1987). En effet, on estime que seulement 7 à 28% des besoins des sols en fumure organiques sont couverts (Vall *et al.*, 2006a) avec une plus grande proportion pour les éleveurs grâce à un chargement animal favorable ($15-30 UBT/ha$) (Vall *et al.*, 2006a). Les freins à l'augmentation des quantités de fumure organique produites sont la faible disponibilité des résidus de récolte (vaine pâture, feux de brousse), la difficulté de collecter les déjections des animaux en mobilité (pâturage journalier, voire divagation nocturne) et les limites en main d'œuvre et en équipement pour faciliter les travaux de collecte, la manipulation, le transport et l'épandage des biomasses (Landais et Lhoste, 1993 ; Blanchard et Vall, 2010).

Les échanges économiques entre agriculture et élevage

L'intégration agriculture-élevage s'analyse aussi via les complémentarités économiques entre les deux ateliers. La diversification des productions animales et le développement de petit élevage (petit ruminant, monogastrique) participent à sécuriser économiquement l'exploitation face aux aléas climatiques ou aux fluctuations des prix des produits et intrants agricoles (Lhoste, 2004b ; Alary *et al.*, 2011).

Les produits animaux (œufs, poulets, lait) diversifient et améliorent les revenus des exploitations (Herrero *et al.*, 2010). Le capital formé par les animaux sur pied agit ainsi comme une assurance contre les moments difficiles. L'accumulation ou le déstockage sont faits selon les besoins monétaires (Lhoste, 2004a ; Alary *et al.*, 2011) permettant un réinvestissement de revenus de la vente des animaux pour assurer certaines dépenses agricoles (location de main d'œuvre pour la récolte, achat d'intrants). De même, les agriculteurs peuvent capitaliser dans l'élevage leurs revenus agricoles, par l'achat d'animaux. C'est par ce mécanisme que les cotonculteurs ont investi dans l'élevage et sont devenus, pour certains, des agro-éleveurs (Vall *et al.*, 2017).

1.4.2.2. Intégration agriculture-élevage à l'échelle du territoire

L'intégration agriculture-élevage se lit aussi à l'échelle du territoire ou de la petite région (Lhoste, 2004a ; Powell *et al.*, 2004). Cette échelle d'analyse est plus récente (Landais, 1985 ; Boutrais, 1992) avec la prise en compte de l'effet de la sédentarisation des éleveurs et des migrations (Dugué *et al.*, 2013) et de l'exploitation des ressources communes (parcours, vaine pâture, point d'eau, etc. ; (Vall *et al.*, 2004 ; Dugué *et al.*, 2013).

Au niveau du territoire, l'intégration agriculture-élevage se manifeste en termes d'opportunités d'échange de produits et de sous-produits (résidus de culture, fumier, contrat de fumure), d'échange de main d'œuvre (gardiennage des animaux travaux agricoles à façons ou location) ou de foncier entre l'agriculture et l'élevage (relations d'entraide entre producteurs) mais aussi à travers des contraintes entre les deux activités agricole et d'élevage en terme d'utilisation des espaces, des ressources (eau, biomasses) et des moyens de production (concurrence ou conflit ; Kossoumna *et al.* 2011 cité par Dugué *et al.* (2013). Ces relations interviennent entre agriculteurs et éleveurs, mais aussi entre élevage mené par un paysan et agriculture conduite par un autre paysan, qu'il soit agriculteur, agro-éleveur ou éleveur (Figure 6).

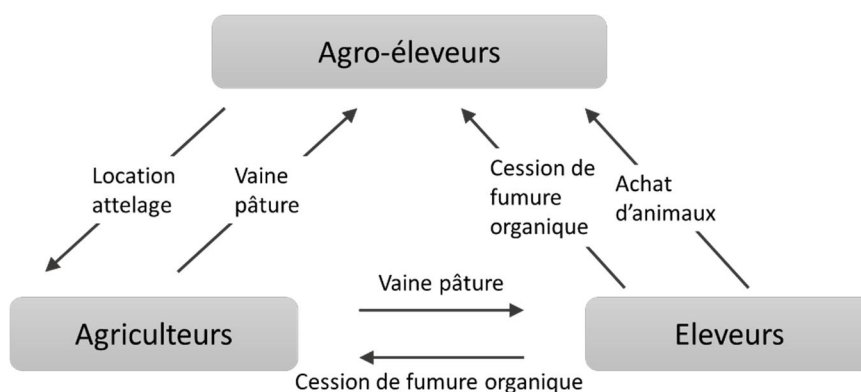


Figure 6. Relations agriculture-élevage sur le territoire (d'après Dugué et al. 2004)

L'analyse de l'intégration agriculture-élevage à cette échelle implique la mobilisation de cadres conceptuels spécifiques, mixant une analyse des flux de matières et les services socio-économiques et écosystémiques, entre les cultures, animaux et pâturage (Moraine et al., 2012).

La prise en compte de l'intégration agriculture-élevage à l'échelle des territoires permet d'analyser les modes de production et de gestion des ressources, d'évaluer l'effet des changements de pratiques et de travailler sur l'optimisation de ces flux. Dans l'Ouest du Burkina Faso, des travaux de recherche ont abordé la compétition sur l'usage des résidus de culture entre les activités agricoles et d'élevage dans le cadre du développement de l'agriculture de conservation (Dongmo, 2009 ; Andrieu et al., 2014 ; Diarisso et al., 2015).

1.4.3. Facteurs d'évolution des relations agriculture-élevage

L'intégration agriculture-élevage reste un processus évolutif qui varie suivant le contexte climatique, économique, social et politique de la région considérée (Powell et Williams, 1995).

Contexte climatique. Suite aux sécheresses des années 70s et 80s, la descente des éleveurs du Sahel vers les zones pluvieuses où l'élevage restait peu pratiqué à cause de la pression parasitaire (Dugué et al., 2013) et la sédentarisation progressive de leurs habitats et de leurs animaux les amènent à s'orienter davantage vers les productions agricoles (céréales), mobilisant la fumure organique produite.

Contexte économique. L'accroissement démographique des villes d'Afrique subsaharienne s'accompagne d'une augmentation de la consommation en produits alimentaires variés (légumes et fruits frais, viandes blanches et rouges, poissons, œufs, lait...) représentant une opportunité de marché à saisir par les producteurs (Powell et al., 2004).

Le développement des marchés est un précurseur au développement de systèmes agricoles spécialisés. En Afrique de l'ouest, naissent en zone péri-urbaine des filières de maraîchage, laitière, d'embouche et des élevages à cycle court (porcins, volailles) à côté des cultures

industrielles et de l'élevage extensif. Il demeure tout de même des systèmes mixtes, en voie d'intensification sans spécialisation.

L'intensification des systèmes de polyculture-élevage modifie le niveau d'intégration agriculture-élevage (Pingali, 1993). Initialement l'agriculture et l'élevage peu intensifs sont conduits par des exploitations séparées. Le 1^e niveau d'intensification passe par un début d'intégration agriculture-élevage à travers les animaux de trait, l'affouragement des animaux et la fumure organique. Puis les systèmes se diversifient et réalisent des investissements améliorant l'offre fourragère. Enfin l'orientation vers une forte commercialisation des produits engendre une nouvelle spécialisation des systèmes.

Contexte social. L'accroissement démographique est important et continu depuis les années 1960 en Afrique subsaharienne dans les villes et les campagnes modifiant les relations agriculture-élevage et les systèmes de polyculture-élevage (Dugué *et al.*, 2004, 2013). Elle s'est accompagnée d'une augmentation des surfaces cultivées pour assurer la sécurité alimentaire et améliorer les revenus des ménages et d'une diminution des surfaces pastorales et des jachères. Avec une densité humaine inférieure à 60 habitants par km², la pression démographique est faible et les terres agricoles restent disponibles. La main d'œuvre est limitante et l'agriculture et l'élevage indépendants et spécialisés sont plus attractifs que des systèmes intégrés. Le travail est la contrainte majeure et son coût est relativement élevé par rapport au coût de la terre. La productivité agricole est maintenue à travers la mise en jachère des terres, qui reste privilégiée par rapport à l'épandage de fumier qui nécessite plus de travail. Les systèmes agricoles restent extensifs et les productions agricole et d'élevage sont souvent des activités séparées (Powell *et al.*, 2004).

Au-delà de 60 habitants au km², les surfaces cultivées progressent au détriment des zones de parcours. L'offre fourragère limite les activités d'élevage avec une situation extrême une réduction de la place de l'élevage (réduction de la taille des troupeaux et départ de troupeaux au moins de manière saisonnière). L'agriculture et l'élevage sont en forte compétition (Dugué *et al.*, 2004). La pression et l'intensification des productions agricoles et d'élevage conduisent à de plus fortes interactions entre agriculture et élevage (Powell *et al.*, 2004).

Contexte politique. La politique est facteur fort d'évolution de l'intégration agriculture-élevage. La traction animale a été proposée pour développer la production des cultures d'exportation (coton, arachide) et satisfaire les besoins des huileries et des filatures des pays du Nord. Ces filières ont bénéficié de l'appui de l'Etat et des sociétés de développement (crédit ou don d'équipements, d'animaux et d'aliment bétail, formation et vulgarisation, assistance vétérinaire, zootechnique et sur la mécanisation), ce qui incita les paysans à adopter la traction animale et les cultures industrielles. Progressivement, l'intégration agriculture-élevage est apparue. Avec les programmes d'ajustement structurel et de désengagement de l'Etat, les programmes d'appui au développement de la traction animale ont disparu progressivement

réduisant les opportunités d'acquisition pour les paysans non-équipés (acquisition, entretien des outils, suivi vétérinaire, etc.) (Lhoste, 2004a ; Vall *et al.*, 2004 ; Dugué *et al.*, 2004).

1.5. ECOLOGICAL NETWORK ANALYSIS, UNE METHODE D'ANALYSE DE LA DURABILITE DES AGROECOSYSTEMES

1.5.1. Histoire de la méthode

La notion d'utilisation rationnelle et la conservation des ressources de la biosphère a été abordée au niveau internationale pour la première fois en 1968 lors de la « Conférence de la Biosphère » de l'UNESCO (UNESCO, 1993). Puis, il a fallu attendre jusqu'en 1992, lors du Sommet de la terre pour aborder le concept de « développement durable ». Lors de ce sommet, il a été affirmé la nécessité de favoriser les synergies plutôt que les oppositions entre l'utilisation et la conservation des ressources et de fonder des programmes de recherche interdisciplinaire sur l'homme et la biosphère. Le besoin de modèles de production efficaces sur l'usage des ressources, écologiquement sains et productifs est né (Conway, 1985 ; Gliessman, 1990).

Les premières expériences de développement et d'application de méthodes décrivant qualitativement (Conway, 1985) ou évaluant quantitativement (Dalsgaard *et al.*, 1995) les performances productives et les impacts écologiques des systèmes agricoles complexes sont apparues.

Parmi ces méthodes, la méthode *Ecological Network Analysis* (ENA ou analyse des réseaux écologiques) développée en écologie dans les années 1970-1980 (Hannon, 1973 ; Finn, 1976) à partir de la théorie d'input-output de l'économie (Leontief, 1936), permet de considérer un écosystème comme un réseau de flux complexe, d'en analyser la structure et le fonctionnement et d'en extraire certaines propriétés clés (recyclage, stockage, intensité des échanges, dépendance et autonomie etc.). Elle permet de représenter et d'analyser les processus écologiques à l'échelle de l'écosystème (Finn, 1980 ; Ulanowicz, 2004).

Appliquée aux réseaux de flux de biomasses ou de nutriments dans les agroécosystèmes, la méthode ENA permet de forger un lien entre la théorie de l'écosystème et l'analyse des systèmes de production afin d'évaluer les quantités de ressources mobilisées pour la production d'une quantité de biens, analyser les relations entre compartiments ou activités dans les systèmes agricoles et produire des indicateurs quantifiant leurs attributs écologiques (Dalsgaard et Oficial, 1997 ; Alvarez *et al.*, 2014).

1.5.2. Méthode Ecological Network Analysis et évolutions

L'analyse des réseaux est une branche de l'écologie (biologie-mathématiques) qui traite de l'application des méthodes mathématiques sur les modèles de flux-stock, et servant à caractériser le fonctionnement écologique des écosystèmes naturels par une analyse des interactions dans l'écosystème (Fath et Patten, 1999a).

L'analyse de réseau est une façon fondamentalement différente d'étudier les écosystèmes car elle donne des valeurs quantitatives à des notions comme l'interdépendance (Fath et Patten, 1999a), le recyclage, les flux traversants totaux, etc. Elle permet d'identifier et de quantifier les effets directs, indirects et intégrants des objets étudiés dans le cadre d'un système connecté. La spécificité de cette méthode est sa capacité à analyser à l'échelle du système, les relations entre de nombreuses composantes et en produisant une interprétation holistique de la structure et du fonctionnement de ce système complexe.

1.5.2.1. Qu'est-ce que l'analyse input-output initiale ?

L'analyse *input-output* (ou entrées-sorties) est une technique quantitative issue de l'algèbre linéaire permettant d'étudier les interdépendances entre différents secteurs de l'économie, en tant que système de biens et de services interdépendants (Leontief, 1936).

L'analyse *input-output* est appliquée dans les analyses de systèmes pouvant être conceptualisés comme des réseaux d'interaction de compartiments échangeant des ressources (Rufino *et al.*, 2009a). Les modèles matriciels entrée-sortie produisent des indices mesurant les effets de changements d'un secteur sur d'autres secteurs, connectés indirectement à travers l'ensemble d'un système complexe.

1.5.2.2. Adaptation de l'analyse input-output à l'étude des écosystèmes

L'étude des écosystèmes a longtemps mobilisé des méthodes d'analyse s'intéressant à de petits sous-ensembles d'interactions se produisant dans les écosystèmes et éclipsant la plupart des autres interactions (Fath *et al.*, 2007). La modélisation par simulation a été expérimentée avec difficultés pour représenter tous les processus biologiques à l'échelle du système (Ulanowicz, 2004).

L'analyse des réseaux permet, elle, d'analyser les propriétés structurelles et fonctionnelles des écosystèmes de manière systématique et holistique (Hannon, 1973). Elle permet de révéler la structure des écosystèmes et la dépendance directe et indirecte des composantes du système sur les autres (Fath et Patten, 1999a) ; les effets directs et indirects sont sources de propriétés holistiques (Fath *et al.*, 2007). Elle offre une vision holistique des systèmes complexes, enrichissant les approches limitées à des interactions spécifiques.

1.5.2.3. Différentes approches d'Ecological Network Analysis

Différentes approches sont mobilisées et plusieurs lignes ont été développées dans la théorie de l'analyse des réseaux pour déterminer la structure, le fonctionnement et les propriétés émergentes des écosystèmes. Ces lignes sont : (a) l'interdépendance des organismes dans un écosystème pour étudier les flux totaux qui lient directement et indirectement ces composantes à leur système ; (b) les objectifs de fonctions « *function goals* », dans les écosystèmes qui fonctionnent pour maximiser leur stockage total direct et indirect, ou pour maximiser le stockage direct et indirect ; (c) l'analyse dynamique pour identifier le contrôle dans un écosystème ; (d) l'utilisation de la théorie de l'information pour étudier les niveaux trophiques mixtes et les interactions relationnelles entre les composantes ; (e) l'analyse de réseau-environ pour identifier les propriétés émergentes et holistiques des réseaux (Fath et Patten, 1999a).

L'analyse des réseaux, « *network analysis* » et l'analyse de réseau-environ, « *network environ analysis* » se subdivisent en 3 types d'analyse : *flows analysis*, *storage analysis* et *utility analysis*. Ces trois types d'analyse sont à l'origine de l'analyse des différentes dimensions de l'agroécosystème (structure, fonctionnement et propriétés émergentes). Selon (Fath et Patten, 1999a), la structure est la position relative d'une composante par rapport à une autre déterminée par ses connections au sein du réseau. Le fonctionnement est la quantité et le type d'énergie ou de matière qui traverse ces connections. Le besoin des écologistes de quantifier ces deux dimensions des systèmes écologiques répondent aux enjeux de biodiversité et de renforcement des régulations biologiques dans les écosystèmes.

Ce travail s'appuie sur l'analyse des réseaux de flux, « *flows analysis* » ou « *throughflow analysis* », qui est appliquée fréquemment dans les agroécosystèmes pour analyser le recyclage de la matière entre les différents compartiments agricoles et l'intégration des différentes activités.

1.5.2.4. ENA pour l'analyse de la structure des écosystèmes

Pour analyser la structure des écosystèmes, les écologistes ont introduit en écologie des indicateurs issus de la théorie de la communication et de l'information : l'Information Mutuelle Moyenne (AMI) (Rutledge *et al.*, 1976 ; Ulanowicz, 2001), et l'indice de Shannon (MacArthur, 1955) développé initialement par Boltzmann (1872) cité par Ulanowicz (2011a, 2011b) pour caractériser respectivement l'organisation du réseau des flux de nutriments et d'énergie, et la diversité des flux. AMI permet de mesurer l'organisation et la structure des flux dans les écosystèmes en mesurant l'information associée à l'échange de matière et d'énergie. L'indice

de Shannon, encore appelé Incertitude Statistique (H_R) (Latham et Scully, 2002) est la limite supérieure de l'AMI et mesure la diversité des flux pour une certaine valeur de flux traversant.

1.5.2.5. ENA pour l'analyse du fonctionnement des écosystèmes

L'analyse quantitative du fonctionnement des systèmes a été permise par le principe de l'analyse des flux et le développement de l'indice de recyclage de Finn (Finn, 1976). L'analyse des flux s'appuie sur une matrice appelée « *structure du système* » résultant de l'analyse input-output. La matrice définit les caractéristiques du système (Hannon, 1973) et les relations causales dans le système (Finn, 1976 ; Patten, 1978). La construction de la matrice se fait autour des flux entrant, sortant et traversant les compartiments du système (Finn, 1976).

L'analyse des flux s'appuie alors sur trois mesures : (i) la somme de tous les flux traversant les compartiments du système, ou « *Total System Throughflow* » (TST) ; (ii) la longueur moyenne du trajet à travers lequel passe un flux entrant ou « *Path Length* » (PL) ; et (iii) l'indice de recyclage de Finn, ou « *Finn Cycling Index* » (FCI), qui quantifie l'importance du recyclage dans le système. La notion d'état d'équilibre des flux est une notion importante dans les systèmes dynamiques, grâce aux flux conservateurs. Finn (1976) a considéré les flux conservateurs pour les systèmes en état d'équilibre et ceux en état de non équilibre, les dérivés de compartiments positifs considérés comme des flux sortants, et les dérivés de compartiment négatifs comme des flux entrants. Ceci a permis à Schaubroeck *et al.* (2012) de définir mathématiquement l'état d'équilibre. Certains auteurs comme (Dame, 1972) ont simplifié les modèles des écosystèmes étudiés en supposant qu'ils obéissaient aux lois thermodynamiques et étaient dans un état d'équilibre.

1.5.2.6. ENA pour l'analyse des propriétés émergentes des écosystèmes

L'analyse de réseaux environs, ou « *network environ analysis* », permet d'analyser de façon holistique les interactions environnementales afin d'identifier les propriétés émergentes du comportement de l'écosystème, qui ne sont évidentes par observations directes. Les bases de l'analyse de réseau environ ont été fixées par Patten (1978), par l'introduction de la théorie des systèmes dans l'analyse des réseaux. Les propriétés émergentes, ou propriétés non réductibles, découlent de la combinaison d'ensembles fonctionnels pour produire des ensembles fonctionnels plus grands (Odum, 1969).

Cette analyse permet de dévoiler les quatre propriétés fondatrices des écosystèmes : les effets indirects, l'amplification, l'homogénéisation et la synergie (Fath et Patten, 1999a).

La dominance **des effets indirects** sont des flux de matières associés de manière non adjacentes entre compartiments connectés. Les processus indirects peuvent exercer une

dominance dans le système, ce qui témoigne que la notion de comportement des objets est profondément incorporée dans le réseau.

L'amplification du réseau quantifie le nombre de fois qu'une ressource provenant de différentes sources entre dans un compartiment avant de le quitter (Fath et Patten, 1998). Cela traduit le recyclage de la ressource dans les compartiments.

L'homogénéisation correspond à une bonne intégration des ressources dans le réseau par l'intermédiaire du recyclage donnant lieu à une distribution homogène des flux.

La synergie relie les relations qualitatives directes et indirectes en montrant une organisation du réseau plus mutualiste sur l'ensemble à comparer aux interactions directes seules qui ne peuvent le permettre. Elle traduit les interactions entre compartiments du système 2 à 2. Cette approche d'analyse des réseaux environs est timidement mobilisée pour investiguer les agroécosystèmes (Stark, 2016).

1.5.3. Ecological Network Analysis appliquée aux agroécosystèmes

1.5.3.1. Opportunité d'analyse des agroécosystèmes grâce à l'Ecological Network Analysis

L'ENA ou analyse des réseaux de flux est une méthode à l'origine développée pour l'analyse des écosystèmes mais applicable à tout type de système conceptualisable en réseau de flux (Fath et Patten, 1999b). Les agroécosystèmes peuvent être conceptualisés en réseaux d'interactions avec des compartiments échangeant des ressources (biomasses, énergie, nutriments, etc.) (Rufino *et al.*, 2009a). Un agroécosystème est un écosystème modifié par l'homme qui respecte les principes écologiques fondamentaux (Pesson, 1978), avec un objectif de production agricole. La pertinence de l'utilisation de cette méthode pour l'étude des agroécosystèmes n'est plus à démontrer (Rufino *et al.*, 2009a ; Alvarez *et al.*, 2014).

Chaubet (1992) propose une comparaison des caractéristiques des écosystèmes et des agroécosystèmes en les expliquant par leur différence de maturité (Tableau I). Dans les agroécosystèmes, la simplification des processus naturels (artificialisation, perte de biodiversité, etc.) fait apparaître des caractéristiques de systèmes immatures (faible recyclage de l'énergie et des nutriments, perte de fertilité des sols, de biodiversité, faible régulation des populations, etc.). Pour faire face à ces limites, la gestion des agroécosystèmes s'appuie sur un recours important à des intrants, hypothéquant la durabilité des systèmes. Certains auteurs invitent à concevoir des agroécosystèmes au fonctionnement proche des écosystèmes naturels (agroécologie) (Altieri, 1986), en transformant les agroécosystèmes pour leur faire gagner en maturité, jouant sur la biodiversité et la régulation de la biocénose (Chaubet, 1992).

D'autres caractéristiques et/ou propriétés des écosystèmes sont traduites par les notions de stabilité, diversité, résilience, constance, persistance, etc. (Cordonnier, 2004), évaluées par une grande variété d'indicateurs décrit par Cordonnier (2004) ; Pimm (1984). Un système est *stable* si et seulement si les variables reviennent toutes à l'équilibre initial après une perturbation (Pimm, 1984). La *résilience* définit la capacité des systèmes écologiques à maintenir de façon dynamique leurs structures, leur organisation et leurs propriétés face à des chocs (Holling, 1973 ; Peterson *et al.*, 1998). La *constance* est la propriété de ne pas changer au cours du temps, à ne présenter que de faibles fluctuations, faisant apparaître un état d'équilibre (Grimm et Wissel, 1997). La *persistance* exprime le maintien de l'intégrité du système au cours du temps (Carpenter *et al.*, 2001). Plusieurs de ces notions ont déjà été appliquées à l'étude des agroécosystèmes. La stabilité et la résilience ont été abordées par (Dalsgaard et Oficial, 1997), et (Stark *et al.*, 2018), dans leurs études respectives de la durabilité écologique de systèmes à base de riz des Philippines et de l'intégration culture-élevage dans les systèmes mixtes de Guadeloupe, d'Amazonie brésilienne et de Cuba. Le recyclage et la diversité au sein des agroécosystèmes ont été abordés dans ces études mais aussi dans d'autres études très diverses : sur le recyclage de l'azote dans les exploitations mixtes des Hautes-terres de Madagascar (Alvarez *et al.*, 2014) dans les rizières tempérées et humides d'Espagne (Fores et Christian, 1993) et dans les systèmes mixtes des Hautes-Terres du nord de l'Ethiopie (Rufino *et al.*, 2009a), ou encore dans les fermes laitières néerlandaises au Pays-Bas (Groot *et al.*, 2003).

Tableau I. Variables d'appréciation de la durabilité des exploitations de polyculture-élevage

Caractéristiques	Agroécosystèmes	Ecosystème naturel
Chaînes trophiques	Simple	Complexes
Richesse spécifique	Faible et maîtrisée	Forte
Cycles biogéochimiques	Ouverts avec pertes et input	Fermés (recyclage)
Stabilité	Instable	Stabilité structurelle
Intervention humaine	Nécessaire	Pas nécessaire
Permanence dans le temps	Restreinte	Longue
Phénologie	Synchronisée artificiellement	Saisonnière
Maturité	Immaturité : stades initiaux de la succession écologique	Maturité : Climax
Stratégie de croissance	Stratégie r : forte fluctuation des populations (croissance) exponentielle en conditions favorables mais hécatombe en cas de ressources épuisées), espèces opportunistes	Stratégie K : Stabilité des populations (durée de vie longue et milieu stable), espèces spécialisées ou compétitrices

1.5.3.2. Application de l'ENA à l'étude des agroécosystèmes et les dimensions étudiées

L'application de la méthode ENA à l'étude des agroécosystèmes a concerné initialement l'application de l'analyse des flux (Rufino *et al.*, 2009b ; Dalsgaard *et al.*, 1995), avec, plus récemment une adaptation méthodologique permettant d'analyser la structure et le fonctionnement des agroécosystèmes par la prise en compte de nouveaux indicateurs (Stark *et al.*, 2018). L'analyse des propriétés des agroécosystèmes reste une perspective de recherche (Stark, 2016) qui devrait connaître un développement les années à venir.

Les détails de l'application concrète de la méthode *Ecological Network Analysis*, appliquée aux agroécosystèmes sont contenus dans le chapitre méthodologie CHAPITRE II (page 36).

1.6. CONCLUSION PARTIELLE

La revue de littérature présentée décrit une large diversité de concepts liés au développement d'une agriculture productive et durable. Les membres du Dispositif « ASAP » visent, en Afrique de l'ouest, à accompagner les systèmes de production vers une amélioration de leur productivité tout en assurant une réduction de leurs impacts environnementaux. Ils ont investi des travaux de recherche sur la contribution des pratiques d'intégration agriculture-élevage à l'intensification écologique. Les concepts d'intensification écologique et d'agroécologie sont en effet retenus pour définir les modèles de production agricole à développer dans le contexte de l'Afrique de l'Ouest.

L'intensification écologique apporte la vision double des enjeux auxquels doit faire face l'agriculture d'Afrique de l'Ouest. Ce concept fait référence à la nécessaire « écologisation des pratiques » afin de réduire les externalités négatives de l'agriculture sur l'environnement et renforcer la production de services environnementaux en mobilisant les fonctions des écosystèmes et les mécanismes naturels tout en utilisant de façon raisonnée les intrants. Ce concept fait également référence au nécessaire accroissement de la production agricole, dans ce contexte. Aussi, vu le contexte économique difficile des exploitations d'Afrique de l'Ouest, il paraît nécessaire de privilégier la valorisation des ressources locales, sans interdire un usage efficient des intrants chimiques afin de soutenir la production agricole. L'intégration agriculture-élevage a été retenue comme moyen pour parvenir à une intensification écologique et donc à la durabilité des systèmes de production. Cette pratique est une pratique qui implique l'ensemble des activités de l'exploitation. Elle nécessite, pour l'aborder de développer une vision holistique. Elle offre des potentialités de durabilité des systèmes de production pertinents.

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

2.1. ZONE D'ETUDE ET ECHANTILLONNAGE

2.1.1. Caractéristique du village de Koumbia

2.1.1.1. Situation géographique

Le village de Koumbia¹ est le chef-lieu de la commune rurale de Koumbia situé dans la province de Tuy à l'Ouest du Burkina Faso. La commune rurale de Koumbia compte 14 villages y compris celui de Koumbia. Ses coordonnées géographiques sont : 4°24'01" de longitude et 12°42'20" de latitude Nord avec une altitude 290 m au-dessus du niveau de la mer. Le village est situé sur la route nationale n°1, à 34 km au Sud-Ouest de Houndé (chef-lieu de la province) et à 67 km à l'Est de Bobo-Dioulasso. D'une superficie estimée à 9 700 ha, le terroir du village de Koumbia est limité par ceux de Sébedougou à l'est, de Dankari au nord-est, de Kongolikan à l'ouest, de Soa et de Gombélé Dougou au sud, où la forêt classée de la Mou d'une superficie de 34 000 ha, matérialise la limite du territoire (Figure 7).

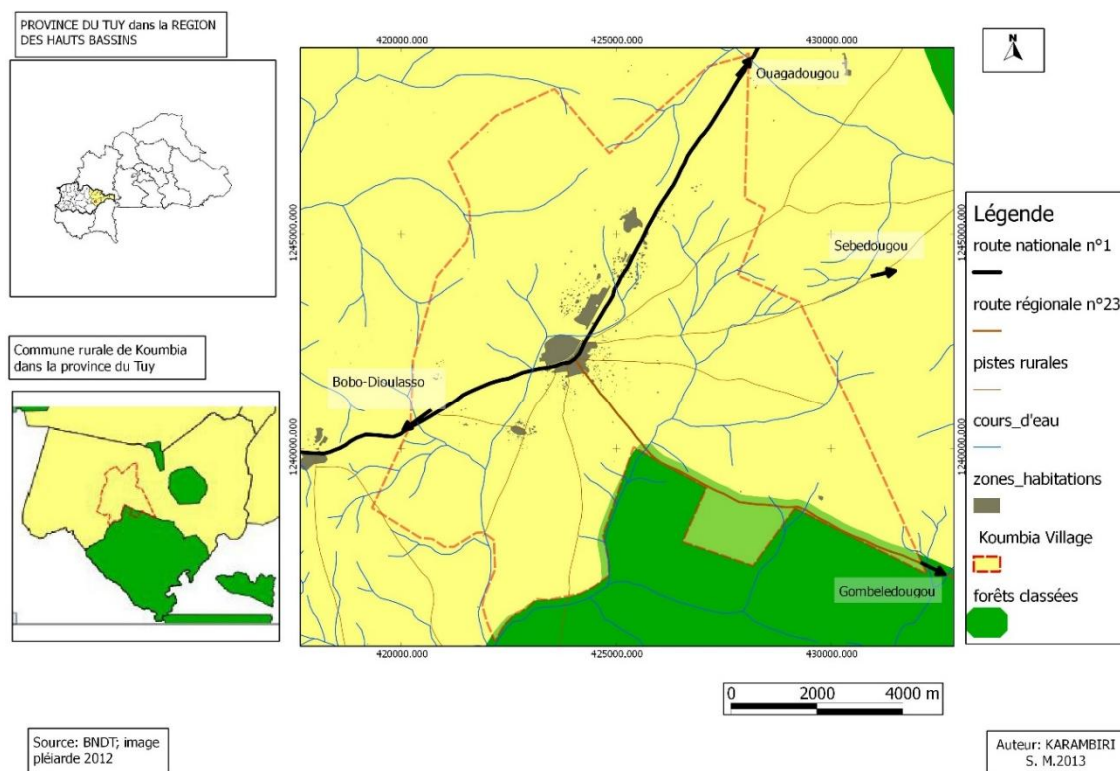


Figure 7. Carte du territoire du village de Koumbia

¹ Le village de Koumbia dont il est question dans le texte correspond en fait aux villages de Koumbia et de Waly. Le village de Waly, ancien quartier de Koumbia, a pris son indépendance administrative il y a quelques années mais le territoire des deux villages sont intimement mêlés. Dans notre étude nous considérons cette zone comme un bloc.

2.1.1.2. Cadre biophysique

❖ Caractéristiques climatiques

La province du Tuy est située dans la zone agro-climatique de type nord-soudanien et est comprise entre les isohyètes 800 et 1 000 mm.an⁻¹ (Vall et Diallo, 2009 ; Fontès et Guinko, 1995 ; Badolo, 2009). Le climat de cette zone se caractérise par une unique saison des pluies (de mai à octobre), une saison sèche froide (de octobre à février) et une saison sèche chaude (de mars à avril).

La pluviométrie, souvent mal répartie dans l'espace et dans le temps, est très irrégulière d'une année à l'autre. La Figure 8 donne l'évolution de la pluviométrie entre 2005 et 2014 pour la station pluviométrique de Koumbia. Cette pluviométrie a varié entre 754 et 1 202 mm.an⁻¹ sur cette période. Les deux années de collecte de données (enquête en 2012-13 et suivi en 2013-14) étaient des années respectivement déficitaire et normale.

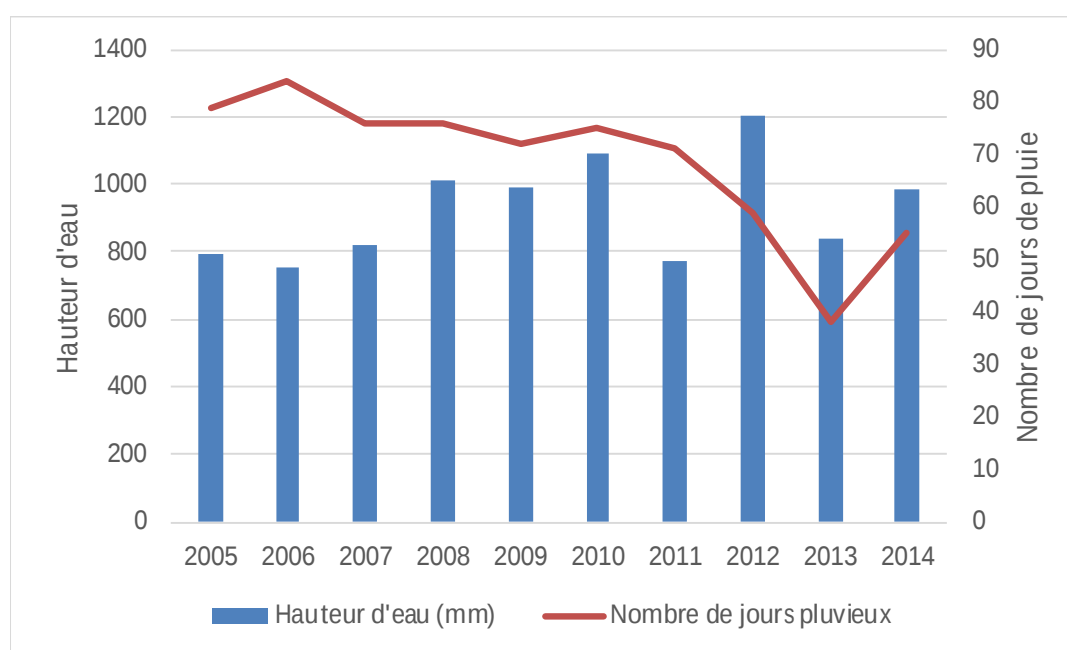


Figure 8. Hauteur d'eau et nombre de jours de pluie entre 2005 et 2014 dans la station pluviométrique de Koumbia (source UDPC)

❖ Végétation

Les formations végétales de Koumbia se composent de savanes arbustives et arborées selon la classification (Aubreville, 1957). Ces formations végétales se retrouvent à la périphérie du territoire ou le long des cours d'eau sous forme de forêts galerie. Mais le plus souvent, les formations végétales se composent de formations secondaires résultant de l'action de l'homme et du feu.

Les espèces ligneuses les plus fréquentes dans cette zone sont : *Parkia biglobosa* (Jacq.) G.Don, *Detarium microcarpum* Guill. & Perr., *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr., *Khaya senegalensis* (Desr.) A.Juss., *Faidherbia albida* (Delile) A.Chev., *Adansonia*

digitata L., *Azelia africana* Sm. & Pers., *Trichilia emetica* (Forsk.) Vahl, *Diospyros mespiliformis* Hochst. ex A.DC., *Bombax costatum* Pellegr. & Vuillet, *Senna spp.*, *Lannea acida* L., et *Mitragyna inermis* Korth. La forêt classée de la Mou présente par endroit des forêts denses à *Cola cordifolia* Schott & Endl. et *Terminalia laxiflora* Engl. & Diels et des forêts claires à *Gardenia erubescens* Stapf & Hutch et *Daniella oliveri* (Benn.) (Blanchard, 2005).

❖ Réseau hydrographique

Le village de Koumbia est traversé par deux principaux cours d'eau temporaires. Le Saramboué marque la frontière entre le village et la forêt classée de la Mou au sud du territoire et le Djouanhonti draine la partie nord du village (Blanchard, 2005).

❖ Géomorphologie et sols

Le relief de la province du Tuy est constitué de collines, de plaines, de plateaux cuirassés et de vallées. Le village de Koumbia est situé sur une plaine à 300 m d'altitude, cerné de collines à l'ouest sur le territoire de Kongolikan (360 m), à l'est sur le territoire de Sébédougou (360 m), et au nord et au sud par deux petites collines, respectivement le *Popibori* et *Gnouhomanbori* (Vall *et al.*, 2006b).

Les sols rencontrés sont des sols ferrugineux lessivés riches en dioxyde de fer (30%), des sols bruns eutrophes riches en éléments alcalins (~15%), des sols sablo-argileux (~15%), des sols gravillonnaires très courants et enfin sur de faibles superficies des sols hydromorphes occupant les vallées des cours d'eau (Coulibaly, 2012 ; DREP-OUEST, 2001). Selon Badolo (2009), près de 20 % de la superficie de la province du Tuy est occupée par des cuirasses ferrugineuses, des affleurements de roches, rendant ces sols impropres à l'agriculture. Les terres cultivables représentent 50 % de la superficie provinciale.

2.1.1.3. Milieu humain

Lors du recensement de 2006, la population du village de Koumbia était estimée à 9 297 habitants (INSD, 2007), ce qui représente 26% de la population de la commune de Koumbia. A l'instar des autres communes de la province du Tuy, la population de la commune de Koumbia se compose essentiellement de trois principales ethnies : les Bwaba (autochtones ; 34,9%), les Mossi (54%) et les Peul (10,4%) (Vall *et al.*, 2006b). La densité humaine a été estimée à 64 hab.km⁻² (Vall *et al.*, 2006b) Cette densité est supérieure à celle de la province (40,6 hab.km⁻²) (Badolo, 2009) et à la moyenne nationale (51,4 hab.km⁻²) (Ouedraogo et Ripama, 2009).

2.1.1.4. Productions agropastorales

Selon Badolo (2009), en moyenne 68,1% de la population active de la province du Tuy pratiquent des activités agro-sylvo-pastorales. Les activités secondaires sont surtout le commerce et l'artisanat.

L'agriculture est caractérisée par une faible utilisation d'intrants et une mécanisation limitée des exploitations. Néanmoins, la traction animale est adoptée par presque toutes les exploitations, avec environ 2,5 paires de bœufs de trait par exploitation (Vall et Bayala, 2007). L'emprise agricole était estimée en 2006 à 35% du territoire villageois (Vall *et al.*, 2006b). Entre 1996 et 2006, la densité humaine a été multipliée par 1,5 et l'emprise agricole par 2,3 (Coulibaly, 2012). La forte poussée démographique et l'extension rapide de la culture du coton ont favorisé l'accroissement des surfaces cultivées et l'exploitation continue des terres agricoles, avec une réduction forte de la mise en jachère (Paré et Tallet, 1999).

Les cultures principales du village sont le coton (45% de l'assolement), le maïs (28%), le sorgho (13%) et secondairement le mil, le riz pluvial, le niébé, le sésame et l'arachide. Les légumineuses n'occupent que 5% de l'assolement (Vall *et al.*, 2006b). Les exploitations mettent en culture en moyenne 9,2 ha avec une grande variabilité selon la taille de l'exploitation. La surface des jachères est estimée à 12% de la surface totale des champs (Vall, 2009). La mécanisation des cultures se limite au labour à la charrue, au sarclage à la herse et au buttage au corps butteur. Le semoir reste très peu utilisé. Les cultures sont mises en place en culture pure (ou monoculture) et en ligne. Les cultures associées, largement pratiquées avant l'avènement de la traction animale, ont été abandonnées avec le développement de celle-ci (Vall *et al.*, 2003). L'utilisation des engrais minéraux (complexe NPK et urée) et l'application des herbicides sont désormais des pratiques courantes sur le maïs et le coton (Ouedraogo *et al.*, 2016). Le sorgho, le mil et les légumineuses reçoivent peu d'intrants (parfois des herbicides et du NPK).

L'élevage constitue la seconde activité économique pour la population de Koumbia. Il est extensif et repose essentiellement sur le pâturage naturel pour la satisfaction des besoins fourragers des animaux (Vall, 2009). Les activités d'élevage sont peu diversifiées et concernent principalement les bovins mais aussi les ovins, les caprins et la volaille. La densité du bétail est de 40 bovins.km⁻² (Vall *et al.*, 2006b). La densité du bétail a été accrue de 2,2 entre 1996 et 2006 (Coulibaly, 2012). Selon la synthèse de Vall (2009), dans les zones où la pression sur les ressources naturelles est forte, on observe une multiplication des conflits agropastoraux. C'est le cas dans le village de Koumbia (Vall *et al.*, 2006b) où les exploitations du type éleveur possède entre 32 et 111 UBT (Blanchard, 2005). A Koumbia, les animaux d'élevage sont conduits au pâturage selon un calendrier pastoral annuel découpé en

périodes : le début de la saison des pluies (*gataaje*), la saison des pluies (*ndungu*), le début des récoltes et la fin de l'hivernage (*yaamde*), la saison sèche froide (*dabbude*) et la saison sèche chaude (*ceedu*) (Vall et Diallo, 2009). Les espaces valorisés par les animaux varient selon les périodes du calendrier et sont les jachères (*soynere*), les champs cultivés (*Gesa*), les pâturages de brousses (*ferlo* et *fukkaawo*) et les bas-fonds (*cofol*). Une partie du cheptel du village est conduit en transhumance en fin de saison sèche pour revenir sur le territoire durant l'hivernage (Vall et Diallo, 2009) pour faire face à la raréfaction des ressources. De plus, une transhumance de fin de saison sèche froide est pratiquée par quelques éleveurs pour éviter les dégâts sur les champs pendant la période de récolte. Pendant la saison sèche chaude, alors qu'il y a peu de fourrages sur les parcours, les troupeaux restant au village, sont en partie stabulés et affouragés avec les résidus de cultures (RDC) ramassés et stockés et des sous-produits agro-industriels (son de céréales, tourteau de coton). D'après Kagoné (2001), ces systèmes d'élevage restent des systèmes à bas-intrants car l'usage des sous-produits agro-industriels reste limité à la période de déficit fourrager et les quantités distribuées restent très faibles.

Dans la zone d'étude, la recherche propose de distinguer trois grands types d'exploitations (Vall *et al.*, 2006a). Les agriculteurs Bwaba et Mossi avec 78% des producteurs ; les éleveurs Peulhs avec 10% et les agro-éleveurs Bwaba et Mossi, voire Peulhs avec 12%. Quelques détails sur la structure de ces exploitations sont présentés ci-dessous.

2.1.2. Echantillonnage des exploitations agricoles

Le choix des exploitations de polyculture-élevage étudiées s'est fait en tenant compte des trois types d'exploitations précédemment identifiés par la typologie proposée par Vall *et al.* (2006a, 2011) :

- les *agriculteurs* (A) principalement orientés vers les productions agricoles, cultivent du coton et des céréales (3 à 12,5 ha) destinés à la vente et à l'autoconsommation et possèdent un élevage d'animaux de trait (<10 bovins) ;
- les *éleveurs* (E) orientés vers les productions animales ont de grands troupeaux d'élevage (>10 à plus de 110 bovins) et cultivent de petites surfaces agricoles (<7,5 ha) ;
- les *agro-éleveurs* (AE) développent les deux activités avec des troupeaux d'élevage conséquents (>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).

Sur cette base, huit exploitations représentatives de la diversité des exploitations et des pratiques d'IAE mises en œuvre ont été sélectionnées : 3 agriculteurs, 2 agro-éleveurs et 3 éleveurs.

Le choix du village et des exploitations étudiées s'appuie sur l'existence d'un panel de données préexistantes et d'une expertise sur la structure, les pratiques d'IAE et les flux de biomasse dans les exploitations de polyculture-élevage du village (Bénagabou *et al.*, 2013 ; Dugué *et al.*, 2013 ; Vall et Diallo, 2009 ; Vall *et al.*, 2006 ; 2012). Des études préalables sur le fonctionnement énergétique des exploitations laitières ou agropastorales (Bénagabou, 2011, 2013 ; Bénagabou *et al.*, 2013) ont permis de mobiliser des données préexistantes (coefficient énergétique fossile, brute etc.). Enfin la récente implication des producteurs de la commune de Koumbia dans des projets de Recherche Action en Partenariat garantit l'intérêt et l'implication des producteurs dans le travail d'enquête et de suivi et donc la fiabilité des données collectées (Vall et Chia, 2014).

Le choix de la méthode d'étude de cas basée sur un petit échantillon d'exploitations s'explique par les contraintes financières, temporelles et humaines imposées par le suivi hebdomadaire et mensuel des flux de biomasse, des temps de travaux et des pratiques d'IAE.

Le choix de la mise en place d'un suivi comme méthode de collecte des données est issu des recommandations d'une étude précédente. Bénagabou *et al.* (2013) recommandaient un suivi régulier des pratiques mises en œuvre par les exploitations en complément d'une enquête déclarative du chef d'exploitation à un moment donné de l'année pour aborder avec davantage de précisions, les volumes d'intrants utilisés par les systèmes de production, les biomasses mobilisées par les pratiques d'IAE ou encore les temps de travaux nécessaires pour chacune des activités. De plus, les méthodes d'analyse mobilisées dans cette étude, *Ecological network Analysis* (ENA) (Finn, 1980) et la méthode Pluri-énergie (Vigne *et al.*, 2013), requièrent des données très détaillées sur l'ensemble des flux d'énergies entrants, traversants et sortants du système. Elles ont ainsi impliqué la mise en place d'un suivi régulier des pratiques mises en œuvre dans les exploitations étudiées. La quantification des flux d'énergies étant une étape importante de l'application des deux méthodes employées, des données détaillées sur les flux des différentes formes d'énergies mobilisées sont requises. Cette approche devrait permettre une compréhension fine des pratiques individuelles et du fonctionnement des systèmes étudiés (Bernard *et al.*, 2011 ; Hostiou et Dedieu, 2009 ; Semporé, 2015 ; Dalsgaard et Oficial, 1997).

2.2. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT ENERGETIQUE SELON UNE DIVERSITE DE METHODES ADOPTEES

2.2.1. Démarche générale adoptée

Afin d'étudier la structure et le fonctionnement des exploitations agricoles et d'identifier des formes d'intégration agriculture-élevage permettant d'atteindre des performances énergétiques élevées, nous proposons dans cette étude de mobiliser quatre approches : deux pour analyser les formes d'intégration agriculture-élevage et deux pour analyser le fonctionnement énergétique de la diversité d'exploitations étudiées.

La démarche générale schématisée est présentée à la Figure 9.

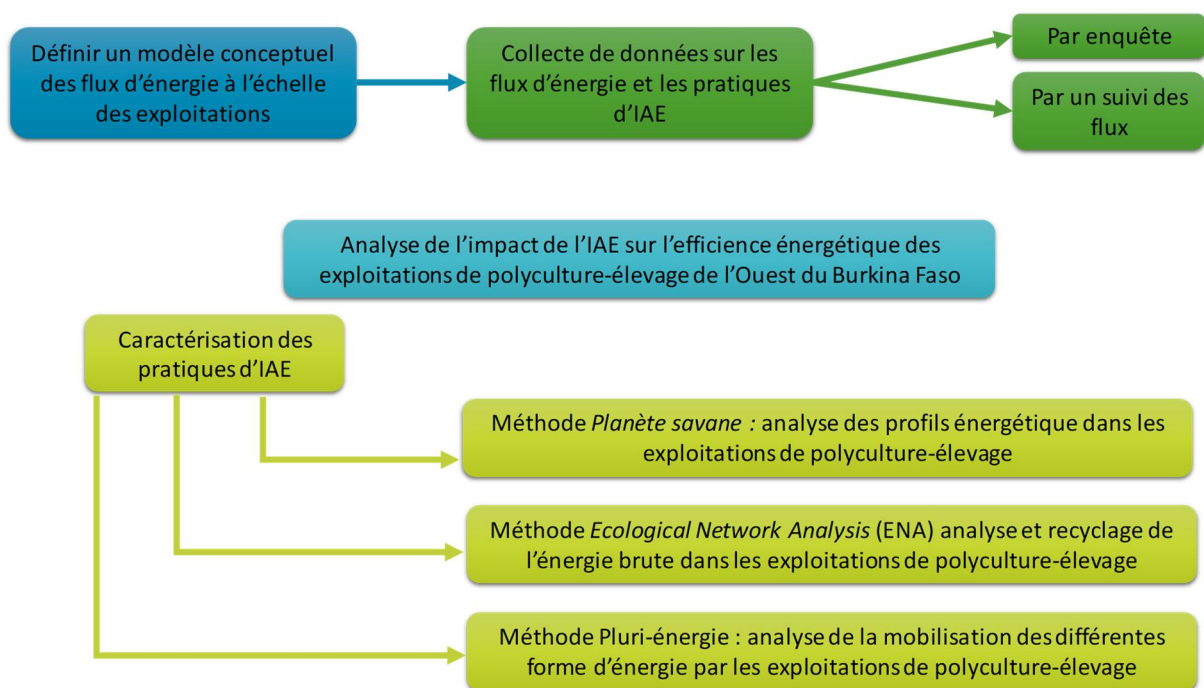


Figure 9. Démarche générale adoptée pour collecter et analyser les données

1. La première approche vise à comprendre et caractériser les formes d'IAE à partir d'une analyse des piliers biotechniques pour appréhender le fonctionnement des exploitations et analyser la diversité des pratiques mises en œuvre.
2. La deuxième approche vise à caractériser des concepts fondamentaux des exploitations étudiées, liés à la mise en œuvre des pratiques d'IAE tels le recyclage, la diversité et l'autonomie des exploitations. Plusieurs auteurs ont fondé la notoriété de l'IAE sur ces concepts (Powell et al., 2004). Nous mobiliserons la méthode *Ecological Network Analysis* (ENA) (Rufino et al., 2009a, Finn, 1980) pour cette approche, qui informe sur la durabilité des exploitations.
3. La troisième approche est basée sur une analyse de l'efficacité énergétique des exploitations de polyculture-élevage avec l'outil « Planète Savane » (Bochu, 2002 ;

Bénagabou, 2011). L'efficacité énergétique a longtemps été présentée comme un indicateur de durabilité environnementale des exploitations (Patterson, 1996 ; Herring, 2006).

4. La quatrième approche porte sur l'analyse du fonctionnement énergétique général des exploitations pour comprendre les compromis d'usage des différentes formes d'énergies, mobilisant la méthode pluri-énergie (Vigne *et al.*, 2013).

2.2.2. L'analyse des pratiques d'IAE

Les indicateurs utilisés pour l'analyse des pratiques d'IAE, s'appuient sur les trois piliers mis en évidence par Landais et Lhoste (1990) : (i) la traction animale, (ii) l'alimentation des animaux à partir du stockage des résidus de culture (RDC) et la production fourragère et (iii) la fertilisation des sols à partir de la production de fumure organique (FO ; Tableau II).

Pour mesurer le niveau de mise en œuvre de chacun des piliers dans les exploitations, trois indicateurs ont été mobilisés (Bénagabou, 2013), permettant de caractériser la diversité de formes d'IAE mises en œuvre. Les trois indicateurs sont : le taux de couverture des besoins en traction animale (CBTA, en % ; équation 1), le taux de couverture des besoins fourragers (CBF, en % ; équation 2) et le taux de couverture des besoins en fumure organique (CBFO, en % ; équation 3). Les modalités de calcul de ces trois indicateurs sont présentées ci-dessous :

$$CBTA (\%) = \frac{\text{Nbre PDB disponibles}}{\text{Surface cultivée (ha)} / 5 (\text{ha/PdB})}$$

Equation 1

$$CBF(\%) = \frac{Q \text{ totale de fourrage stocké (kg)}}{6,25 \text{ kgMS/UBT} / j * 365 \text{ jours} * \text{nbre UBT}}$$

Equation 2

$$CBFO (\%) = \frac{Q \text{ totale FO épandue sur tous les champs (kg)}}{2500 \text{ kgFO /ha/an} * \text{Surface cultivée (ha)}}$$

Equation 3

Avec : Q totale FO pour la quantité totale de fumure organique, Q totale de fourrage pour la quantité totale de fourrage ; UBT pour unité de bétail tropical et Nbre PDB disponibles pour nombre de paire de bœuf de trait disponible.

Tableau II. Procédure de calcul des indicateurs d'intégration agriculture-élevage (Bénagabou et al., 2013)

Type d'indicateur	Principe	Procédures de calcul
Couverture annuelle de besoins en fumure organique (CBFO)	Rapport entre la production totale de fumure organique et le besoin annuel en matière organique des sols d'une exploitation	L'équation tient compte de : 1) Une norme recommandée annuelle de 2,5 tonnes de MS de FO par hectare cultivé (Berger <i>et al.</i> , 1987); 2) Une quantité totale de FO produite et transportée sur les champs de l'exploitation (en kg de MS), en prenant en compte tous les types de FO (parc de nuit, fosse fumière et à compost, tas d'ordure) ; 3) De la surface totale cultivée par l'exploitation (en ha).
Couverture annuelle de besoin fourrager (CBF)	Rapport entre la quantité totale de fourrage stocké et le besoin annuel fourrager des animaux d'une exploitation	L'équation tient compte de : 1) Une norme recommandée journalière de 6,25 kg de MS/UBT de fourrage grossier (Mémento Agronome, 1991) ; 2) Une quantité totale de fourrage stocké par l'exploitation (en kg de MS) en tenant compte de tous les types de fourrages (pailles de céréales, fanes de légumineuses, pailles des pâturages, cultures fourragères) ; 3) Du nombre d'UBT présent sur l'exploitation.
Couverture annuelle de besoins en traction animale (CBTA)	Rapport entre le nombre de paire de bœufs de trait et la surface mise en culture par une exploitation	L'équation tient compte de : 1) Une norme recommandée annuelle de 5 ha/an de surface cultivée par paire de bœufs de trait (Vall et Bayala, 2007). 2) Le nombre de paire de bœuf de trait ; 3) De la surface totale cultivée par l'exploitation.

MS : matière sèche ; FO :fumure organique ; UBT : unité bovin tropical

2.2.3. L'analyse des réseaux écologiques ou Ecological Network Analysis

L'*Ecological Network Analysis* (ENA) est une méthode initialement développée par Finn (1980) pour caractériser le fonctionnement écologique des écosystèmes naturels en considérant les écosystèmes comme un réseau de flux de biomasse et en analysant les propriétés de ce réseau à travers ses flux entrants (*inflows*), ses flux sortants (*outflows*) et ses flux traversants (*internalflows*). Cette méthode appliquée à une diversité de systèmes agricoles (Dalsgaard et Oficial, 1997 ; Rufino *et al.*, 2009a) permet d'évaluer la durabilité environnementale des systèmes agricoles face au défi de l'agriculture durable (voir chap 2 et 5). Plusieurs cadres d'analyses ont été proposés pour analyser les systèmes écologiques (Finn, 1980), environnementaux (Schaubroeck *et al.*, 2012), agricoles (Rufino *et al.*, 2009a ; Stark, 2016). Le cadre utilisé ici est celui de Stark (2016) et de Schaubroeck *et al.* (2012) permettant d'étudier la structure, le fonctionnement et les performances des agrosystèmes. Son application s'appuie sur trois étapes principales : (i) la conceptualisation du réseau de flux d'énergie brute du système étudié, (ii) la modélisation du système étudié (iii) et le calcul des indicateurs spécifiques de la méthode ENA.

2.2.3.1. Conceptualisation du réseau de flux d'énergie brute

La conceptualisation du réseau de flux d'énergie brute d'une exploitation de polyculture-élevage nécessite de : (i) délimiter les frontières de l'exploitation, (ii) de diviser le système en

compartiments, (iii) d'identifier les flux reliant les compartiments entre eux et avec le milieu extérieur, et (iv) d'établir un diagramme de flux. Cette étape de conceptualisation du réseau est une étape importante qui permet d'identifier l'exhaustivité des flux d'énergie brute à prendre en compte.

La délimitation des frontières de l'exploitation dépend fortement de l'objectif de l'étude. Tout choix d'inclure ou d'exclure un compartiment du système affecte les résultats. Comme Rufino *et al.* (2009b), la famille a été incluse dans le système afin d'apprécier le volume de transaction d'énergie brute issue et à destination de la famille (fonction d'autoconsommation de l'exploitation, caractère familiale) (Vall *et al.*, 2006a).

La division du système en compartiments dépend de l'échelle retenue pour l'étude et de la disponibilité des données quantifiant les flux entre compartiments (Schaubroeck *et al.*, 2012). D'un point de vue agronomique, les agroécosystèmes pourraient être compartimentés en sous-système de culture, d'animaux, d'espèces voire de races (Stark, 2016) ou plusieurs compartiments pourraient être agrégés en un seul, ou encore un compartiment désagrégé en plusieurs. Dans cette étude, l'agrégation a été retenue, car les flux d'énergie brute ont été renseignés par activité plutôt que par sous-activité (ex : tige de maïs distribué prioritairement aux bovins et le reliquat consommé par les ovins et caprins ; mélange de même cultures issues de parcelles différentes avant battage).

L'identification des flux reliant les compartiments entre eux et avec le milieu extérieur a permis de distinguer 3 types de flux d'énergie brute: les *inflows* et *outflows* se réalisant entre le système étudié et l'environnement extérieur et les *internalflows* entre les compartiments. Selon la convention de Hirata et Ulanowicz (1984), une distinction a été faite entre les *outflows* utilisables (grains, lait, viande) et les *outflows* inutilisables (vol des animaux, fèces humaines). L'inventaire de tous les flux susceptibles d'exister est nécessaire pour s'assurer d'une prise en compte exhaustive des flux du système (Schaubroeck *et al.*, 2012). Toutefois, tous les flux n'étant pas intéressants à étudier, l'inventaire des flux permet de sélectionner les flux à quantifier et ceux à négliger.

Le diagramme de flux ou modèle conceptuel marque la fin de la première étape (Figure 10). Suivant cette démarche, le système complexe représentant l'exploitation familiale mixte étudiée compte six compartiments : les champs, le troupeau, la famille, le grenier pour le stockage des produits agricoles, le hangar pour le stockage des fourrages et les fosses pour la production de fumure organique. Entre ces compartiments d'une part, et entre les compartiments et l'environnement d'autre part, il se produit des flux de biomasse de trois ordres : les flux entrants (8 *inflows*), les flux sortants (9 *outflows*) et les flux internes (13 *internalflows*).

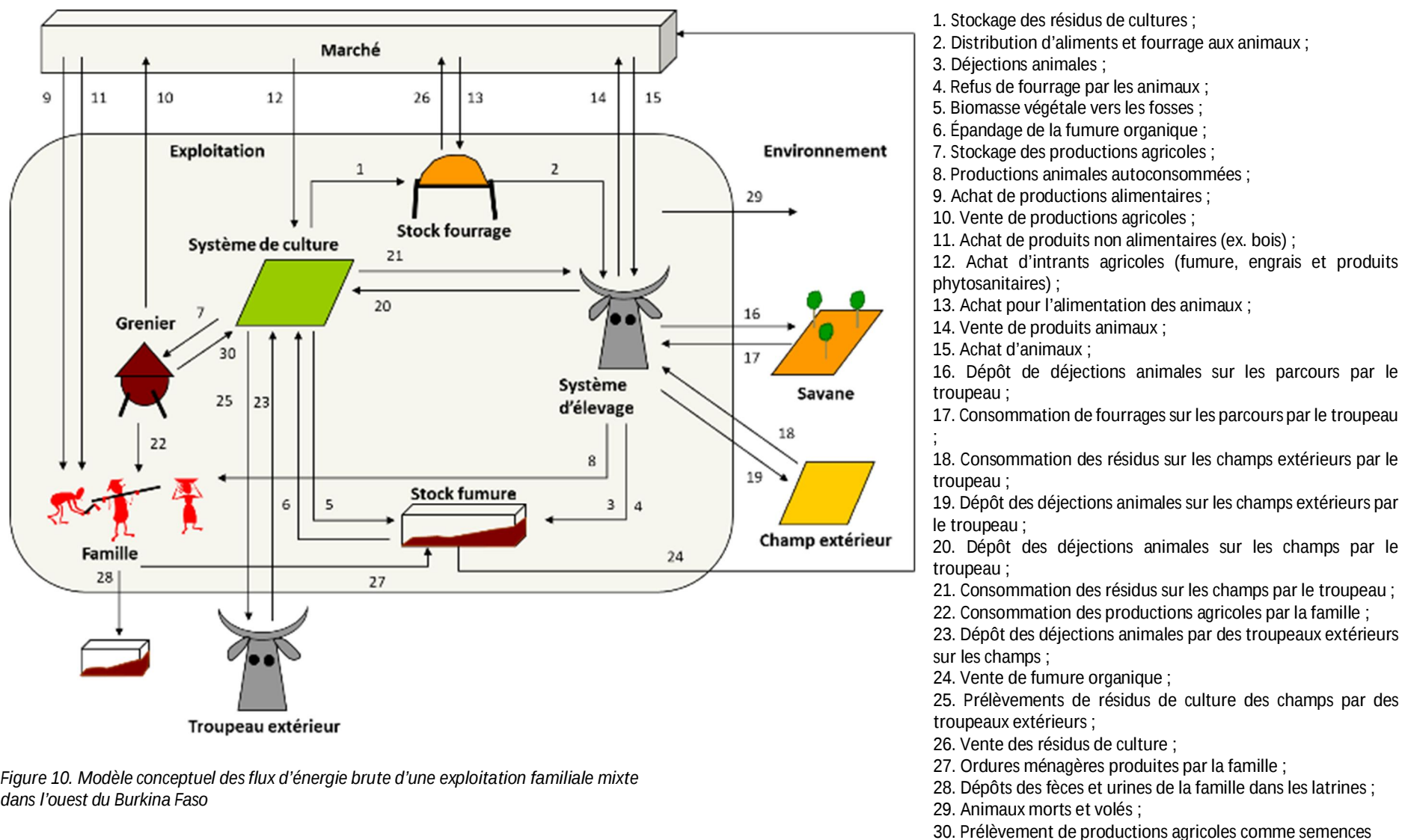


Figure 10. Modèle conceptuel des flux d'énergie brute d'une exploitation familiale mixte dans l'ouest du Burkina Faso

2.2.3.2. Modélisation du réseau de flux d'énergie brute

La modélisation du réseau de flux d'énergie brute consiste à quantifier tous les flux d'énergie brute du réseau et la taille de chaque compartiment afin de prendre en compte les variations de stock qui contribuent indirectement à l'activité du réseau. La modélisation du système passe par : (i) la sélection de l'élément fondamental auquel l'étude s'intéresse, (ii) la quantification des flux et des variations de stock, et (iii) la construction de la matrice des flux.

L'élément fondamental vise à homogénéiser l'ensemble des flux et le contenu des compartiments dans la même unité. Dans l'étude des agroécosystèmes, c'est la biomasse ou les nutriments tels que l'azote qui sont souvent retenus. Le choix de l'énergie brute a été fait dans cette étude pour illustrer un des facteurs limitant des exploitations de polyculture-élevage et discuter de l'usage de cette forme d'énergie renouvelable échangée par les pratiques d'IAE. La quantification des flux et des variations de stock correspond à l'assignation des valeurs aux flux et aux variations de stock. Elle peut être réalisée en combinant des mesures directes, des estimations, le recours à des références ou à des modèles (Fath *et al.*, 2007). La mesure directe est la plus fiable, mais sa réalisation dépend du niveau de détail et de complexité du système.

Un des principes de l'ENA est l'équilibration des compartiments. Dans les systèmes agricoles, la première loi de thermodynamique est appliquée pour équilibration des compartiments permettant de vérifier l'égalité entre les inputs totaux et les outputs totaux ajoutés/soustrait des variations de stock de chaque compartiment. L'équilibration permet d'estimer les flux manquants ou la variation de stock des compartiments. Dans les études des systèmes écologiques, d'autres options existent et sont purement basées sur des méthodes mathématiques (Allesina et Bondavalli, 2004).

La matrice des flux peut être construite à partir de la quantification des flux et des variations de stock. Les lignes représentent les destinations des compartiments, alors que les colonnes représentent l'origine des compartiments. Leur intersection correspond à la valeur des flux entre deux compartiments (Figure 12). Cette matrice de flux construite par Leontief (1936), contient toutes les informations nécessaires pour le calcul des indicateurs d'ENA.

Pour un système H avec 2 compartiments I et J échangeant des flux avec l'environnement et entre eux (Figure 11) :

- Les flux internes (*internalflows*) générés entre compartiments sont notés F_{JI} et F_{IJ} ;
- Les flux sortant (*outflows*) des compartiments du système H vers l'environnement sont notés Y_{OI} et Y_{OJ} ;
- Les flux entrant (*inflows*) provenant de l'environnement vers les compartiments du système H sont notés Z_{IO} et Z_{JO} ;
- Les variations de stock associées à chaque compartiment sont notées X_I et X_J .

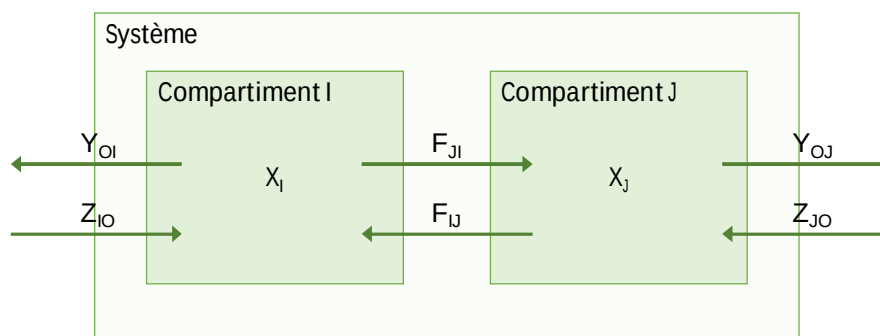


Figure 11. Réseau d'un système à deux compartiments I et J, leur variation de stock (X_I et X_J), les flux internes (F_{JI} et F_{IJ}), les flux sortant (Y_{OI} et Y_{OJ}) et entrant (Z_{IO} et Z_{JO}). Source : (Finn, 1980)

F_{ij} : de $\rightarrow$ à $\downarrow$	H1. Ménage	H2. Culture	H3. Troupeau	H4. Hangar	H5. FO	H6. Grenier	Inflow (Z_{io})	X_i
H1. Ménage	$F_{H1.H1}$	$F_{H2.H1}$	$F_{H3.H1}$	$F_{H4.H1}$	$F_{H5.H1}$	$F_{H6.H1}$	$F_{Y.H1}$	X_1
H2. Culture	$F_{H1.H2}$	$F_{H2.H2}$	$F_{H3.H2}$	$F_{H4.H2}$	$F_{H5.H2}$	$F_{H6.H2}$	$F_{Y.H2}$	X_2
H3. Troupeau	$F_{H1.H3}$	$F_{H2.H3}$	$F_{H3.H3}$	$F_{H4.H3}$	$F_{H5.H3}$	$F_{H6.H3}$	$F_{Y.H3}$	X_3
H4. Hangar	$F_{H1.H4}$	$F_{H2.H4}$	$F_{H3.H4}$	$F_{H4.H4}$	$F_{H5.H4}$	$F_{H6.H4}$	$F_{Y.H4}$	X_4
H5.FO	$F_{H1.H5}$	$F_{H2.H5}$	$F_{H3.H5}$	$F_{H4.H5}$	$F_{H5.H5}$	$F_{H6.H5}$	$F_{Y.H5}$	X_5
H6. Grenier	$F_{H1.H6}$	$F_{H2.H6}$	$F_{H3.H6}$	$F_{H4.H6}$	$F_{H5.H6}$	$F_{H6.H6}$	$F_{Y.H6}$	X_6
Outflow (Y_i)	$F_{H1.Y}$	$F_{H2.Y}$	$F_{H3.Y}$	$F_{H4.Y}$	$F_{H5.Y}$	$F_{H6.Y}$	0	0

Figure 12. Matrice construite à partir des flux entrants, sortants, internes et des variations de flux (H : compartiment ; FO : fumure organique ; X_i : variation de stock)

2.2.3.3. Calcul des indicateurs d'ENA

Parmi les indicateurs initialement développés par Finn (1980) et repris par Rufino *et al.* (2009a) et Stark (2016) pour analyser le fonctionnement des écosystèmes et ceux proposés plus récemment par Stark (2016) pour analyser la structure, le fonctionnement et la performance des agroécosystèmes, 8 indicateurs ont été sélectionnés pour évaluer la structure, le fonctionnement et les performances du réseau d'énergie brute dans les exploitations de polyculture-élevage (Tableau III).

Indicateurs de structures

La densité des liens (Li/n) est le rapport entre le nombre de flux (Li) et le nombre de compartiments (n). Elle caractérise la diversité des flux et la complexité dans les agroécosystèmes.

Indicateurs de fonctionnement

Le *Total System Throughflows* (TST) est la somme de tous les flux traversants chaque compartiment du système et mesure l'activité du système.

Le *Path Length* (PL) est le nombre moyen de compartiments qu'une unité d'*inflow* traverse pendant son passage dans l'agroécosystème depuis son entrée jusqu'à sa sortie. Il est égal

au rapport de TST sur TIN, avec TIN égal à la somme des importations (IN) et des variations de stock. Il mesure l'intensité du recyclage.

Le Taux de Recyclage Interne (TCI) est le rapport entre la somme des *internalflows* (TT) et le TST. Il décrit l'activité générée par l'intégration entre compartiments, indépendamment de l'activité produite par le stockage ou les *inflows*.

Le *Finn Cycling Index* (FCI) évalue le recyclage à travers le rapport entre la part recyclée du TST (notée TSTc) et du TST. Il correspond à l'efficiencia de recyclage de tous les compartiments. Il prend des valeurs comprises entre 0 (absence de recyclage) et 100% (recyclage total).

Indicateurs de performance

La dépendance (D) aux importations est définie comme le rapport entre IN et TST. Il traduit la part du TST qui vient des importations et sert à calculer l'autonomie (1-D).

L'efficiencia d'énergie brute (EEb) est le rapport entre les *outflows* et les *inflows*. Il évalue la performance énergétique de l'exploitation et est commun à plusieurs outils mobilisant le cadre d'analyse économique input-output.

Les pertes (L) sont le rapport entre les *outflows* non recherchés et le TST. L'objectif des agroécosystèmes est de produire des produits agricoles et animaux tout en réduisant leur impact sur l'environnement. Cet indicateur évalue leur capacité à produire peu de déchets.

Tableau III. Indicateurs utilisés dans l'analyse de réseau des flux d'énergie brute dans les agroécosystèmes et leur calcul

Indicateurs	Définitions et mode de calcul	Formules	Interprétation
Indicateurs de structure			
Densité des liens (L/n)	Rapport entre le nombre de flux interne (L) et le nombre de compartiment (n) dans le système	$D = L/n$	Evaluation de la diversité / complexité du système (Szyrmer et Ulanowicz, 1987)
Indicateurs de fonctionnement			
Total System Throughflows (TST)	Somme de tous les flux traversant les compartiments du système	$TST = \sum_{k=1}^n T_k$	Mesure l'activité totale du système (Finn, 1980)
Path Length (PL)	Rapport entre TST et TIN	$PL = \frac{TST}{TIN}$	Evaluation de l'intensité du recyclage du système Nombre moyen de compartiments traversé par une unité d'inflow entre son entrée dans le système à sa sortie (Finn, 1980)
Internal Cycling Rate (ICR)	Rapport entre la somme des internalflows (TT) et le TST	$ICR = \frac{TT}{TST}$	Part de l'activité créée par les flux internes entre les compartiments (Stark et al., 2018)
Finn Cycling Index (FCI)	Rapport entre TSTc et TST 0 < FCI < 1 avec 0 pas de recyclage et 1 recyclage total	$FCI = \frac{TSTc}{TST}$	Efficience de recyclage de tous les compartiments Probabilité qu'une faction de flux d'un compartiment y retourne directement ou indirectement (Finn, 1980)
Indicateurs de performance			
Autonomie (A)	Rapport entre IN et TST	$A = \frac{IN}{TST}$	Evaluation du degré d'autonomie (A) du système. A=1-D (Finn, 1980)
Efficience d'énergie brute (EEb)	Rapport entre les outflows et les inflows	$EEb = \frac{IN}{OUT}$	Evaluation de la performance énergétique du système (Herring, 2006)
AVEC			
Importations	Somme des inflows du système étudié	$IN = \sum_{k=1}^n Z_{k0}$	
Total des des importations	Somme des importations (IN) de chaque compartiment et des variations de stock des compartiments	$TIN = \sum_{k=1}^n Z_{k0} - \sum_{k=1}^n X_k$	
Internal flows	Somme des internal flows	$\sum_{k=1}^n FIJ$	
Flux traversant un compartiment k		$TI = \sum_{k=1}^n FIJ + \sum_{k=1}^n ZOI + \sum_{k=1}^n XI$	

2.2.4. L'analyse énergétique des exploitations de polyculture-élevage avec l'outil « Planète Savane »

La méthode PLANÈTE (Bochu, 2002) a pour objectif de quantifier à l'échelle de l'exploitation agricole, les flux d'énergie entrants non renouvelables et les flux d'énergie sortants renouvelables. La consommation d'énergie fossile étant liée à une production de gaz à effet de serre, elle permet d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation des intrants et aux pratiques agricoles indiquant la contribution de l'exploitation au changement climatique. Elle est donc caractérisée de méthode monocritère. La méthode PLANÈTE a été adaptée et utilisée pour l'étude des profils énergétiques d'exploitations de l'Ouest du Burkina Faso (Bénagabou, 2011) donnant lieu à la création de la méthode PLANÈTE Savane. Cette méthode adaptée permet de disposer aujourd'hui de coefficients énergétiques adaptés au contexte de l'Ouest du Burkina Faso et d'une méthode qui prend en compte la réalité des flux d'énergies des exploitations de la zone. C'est cette méthode qui est utilisée dans le cadre de cette étude.

Les différentes étapes mises en œuvre pour l'analyse énergétique mobilisant l'outil PLANÈTE Savane sont : (i) la conceptualisation de l'exploitation agricole ; (ii) l'inventaire des flux d'énergie entrant (fossile) et sortant (brute) ; (iii) le calcul des coefficients énergétiques brutes et fossiles ; et (iv) le calcul des indicateurs d'efficacité énergétique fossile.

2.2.4.1. Conceptualisation de l'exploitation agricole

L'application de la méthode PLANÈTE débute avec la conceptualisation de l'exploitation agricole sous la forme d'un système énergétique composé des différents compartiments et des flux échangés par les compartiments de ce système avec le milieu extérieur (modèle input-output). La Figure 13 illustre le modèle conceptuel générique utilisé pour décrire une exploitation de polyculture –élevage de la zone et les flux échangés avec l'environnement.

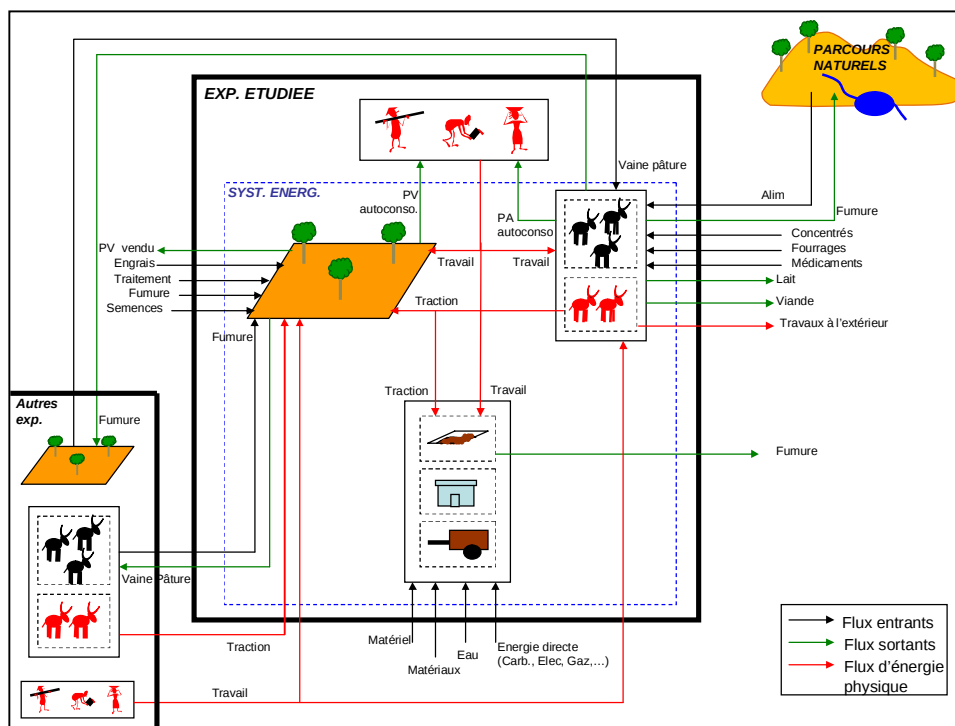


Figure 13. Schéma conceptuel du système énergétique des flux entrées-sorties d'une exploitation agricole (Bénagabou, 2011)

2.2.4.2. Inventaire des flux d'énergie fossile entrant et d'énergie brute sortant

Les flux d'énergies à inventorier sont les flux d'énergie fossile entrant et les flux d'énergie brute sortant.

Il existe deux catégories d'énergie fossile consommée par ces systèmes selon la nature des intrants consommés :

- L'énergie fossile directe : elle correspond à la consommation directe par l'exploitation d'une forme d'énergie fossile tels que le fioul, le gasoil, le gaz, le charbon mais aussi l'électricité.
- L'énergie fossile indirecte : elle correspond à la consommation d'énergie fossile au cours du processus d'extraction, de fabrication et de transport des différents intrants de l'exploitation. Le calcul de la quantité d'énergie fossile indirecte consommée se base sur une analyse en cycle de vie des intrants qui prend en compte toutes les consommations d'énergie fossile « du berceau à la tombe » d'un intrant (Bochu, 2002) ou plus concrètement, de sa fabrication primaire à son utilisation finale en passant par son transport. Les intrants considérés sont les engrais minéraux et organiques, les aliments achetés (concentrés et fourrages...), les produits phytosanitaires, les semences, le matériel, les machines, les produits vétérinaires et l'eau d'irrigation.

Les sorties d'énergie brute correspondent aux productions de l'exploitation qu'il s'agisse de production alimentaire ou non alimentaire. Il s'agit de la production de lait, de viande, de graines, mais aussi de résidus de culture, de fumier, de déjections animales etc. Ces quantités d'énergies sont estimées (en MJ) à travers des estimations des quantités d'intrants ou de produits, et au travers de coefficients énergétiques en mégajoule (MJ) par unité physique d'intrants ou de produits.

2.2.4.3. Coefficients énergétiques brute et fossile

Un coefficient d'énergie qu'il soit fossile ou brute est la quantité d'énergie (fossile ou brute) contenue dans une unité d'intrant ou de produit. Le coefficient est exprimé en MJ/unité physique (UBT, kilogramme, litre) ou monétaires (francs CFA). Des détails sur les modes de calculs des coefficients énergétiques sont présentés en annexe 2.

2.2.4.4. Calcul des indicateurs d'efficacité énergétique fossile

Les performances énergétiques des exploitations sont appréhendées à travers trois indicateurs : les consommations d'énergie fossile, les productions d'énergie brute et l'efficacité énergétique fossile. Les modalités de calcul de ces indicateurs sont présentées dans les équations suivantes :

$$Cons EF = \sum (Qt\ intrant_i \times Coef EF_i)$$

Equation 4

$$Prod EB = \sum (Qté\ produit_p \times Coef EB_p)$$

Equation 5

$$EEF = \frac{Cons EF}{Prod EB}$$

Equation 6

Avec : Cons EF la consommation totale d'énergie fossile (en MJ), Qt intrant_i la quantité d'intrant i consommé (litre, kg, FCFA) et Coef EF_i, le coefficient énergétique fossile de l'intrant i (en MJ/litre, kg ou FCFA), Prod EB la production totale d'énergie brute (en MJ), Qt produit_p, la quantité de produit p (en kg) et Coef EB_p, le coefficient énergétique brute du produit p (en MJ/kg), EEF l'efficacité énergétique fossile (sd) et EE l'efficacité énergétique (sd).

2.2.5. L'analyse pluri énergie

L'analyse pluri-énergie s'appuie sur une méthode d'analyse environnementale conçue par Vigne *et al.* (2013). C'est une version améliorée de la méthode PLANETE (Bochu, 2002) qui ne s'applique qu'à deux formes d'énergies (fossile et brute). Son originalité réside donc dans la prise en compte de deux formes d'énergies supplémentaires que sont l'énergie du travail et

l'énergie solaire. La méthode pluri-énergie se compose de deux grandes parties : (i) la conceptualisation du système, et (ii) son application proprement dite aux systèmes agricoles.

2.2.5.1. Conceptualisation du système agricole étudié

La conceptualisation du système agricole étudié observe trois règles fondamentales : (i) la comptabilisation des différentes formes d'énergies, (ii) la division du système en composantes et (iii) l'inventaire des différents types de flux.

2.2.5.1.1. Comptabilisation de quatre formes d'énergies

Quatre formes d'énergies sont utilisées dans les systèmes agricoles : l'énergie fossile (EF), l'énergie brute (EB), l'énergie liée au travail (ET) et l'énergie solaire (ES).

L'EF correspond à l'énergie fossile consommée directement sur les exploitations (carburants, électricité et gaz) ou indirectement pour produire les intrants des cultures (fertilisants, semences, produits phytosanitaires et eau d'irrigation), les intrants des troupeaux (fourrages, concentrés, soins vétérinaires et animaux de renouvellement) ainsi que les équipements agricoles (matériel et bâtiments).

L'EB correspond à l'énergie calorifique contenue dans les produits animaux et végétaux.

L'ET correspond à l'énergie physique dépensée lors des travaux agricoles réalisés par les animaux ou les humains sur l'exploitation.

L'ES correspond au rayonnement photo synthétiquement actif (*photosynthetically active radiation*, PAR) qui est la part du rayonnement solaire dont les longueurs d'ondes s'étendent de 400 à 700 nm, reçu par la surface agricole de l'exploitation.

2.2.5.1.2. Division du système en composantes

La division du système en composantes consiste à diviser les différentes activités du système agricole en composantes afin de concevoir un système le plus générique possible. A l'issue de cette division, sept composantes ont été retenues dans cette étude : (i) les infrastructures qui contiennent le matériel et les bâtiments de l'exploitation, (ii) le troupeau qui inclue les animaux en production et les animaux nécessaires à la traction animale, (iii) les surfaces cultivées directement utilisées par l'exploitation, (iv) le grenier pour le stockage des productions végétales, (v) le hangar pour le stockage des pailles, (vi) les fosses pour le stockage des effluents et (vii) la famille.

La décomposition du système permet de mener conjointement une analyse globale des systèmes et une analyse plus fine à l'échelle de chaque composante.

2.2.5.1.3. Inventaire des différents types de flux

L'inventaire des différents types de flux d'énergies de ce système consiste à prendre en compte tous les flux d'énergies entrants dans le système (*inflows*), circulants à l'intérieur du système entre les différents compartiments (*internalflows*) et quittants le système (*outflows*). Soixante-et-sept flux potentiels ont été énumérés dans la présente étude dont 15 flux d'EF, 30 flux d'EB, 20 flux d'ET, et 02 flux d'ES (Figure 14).

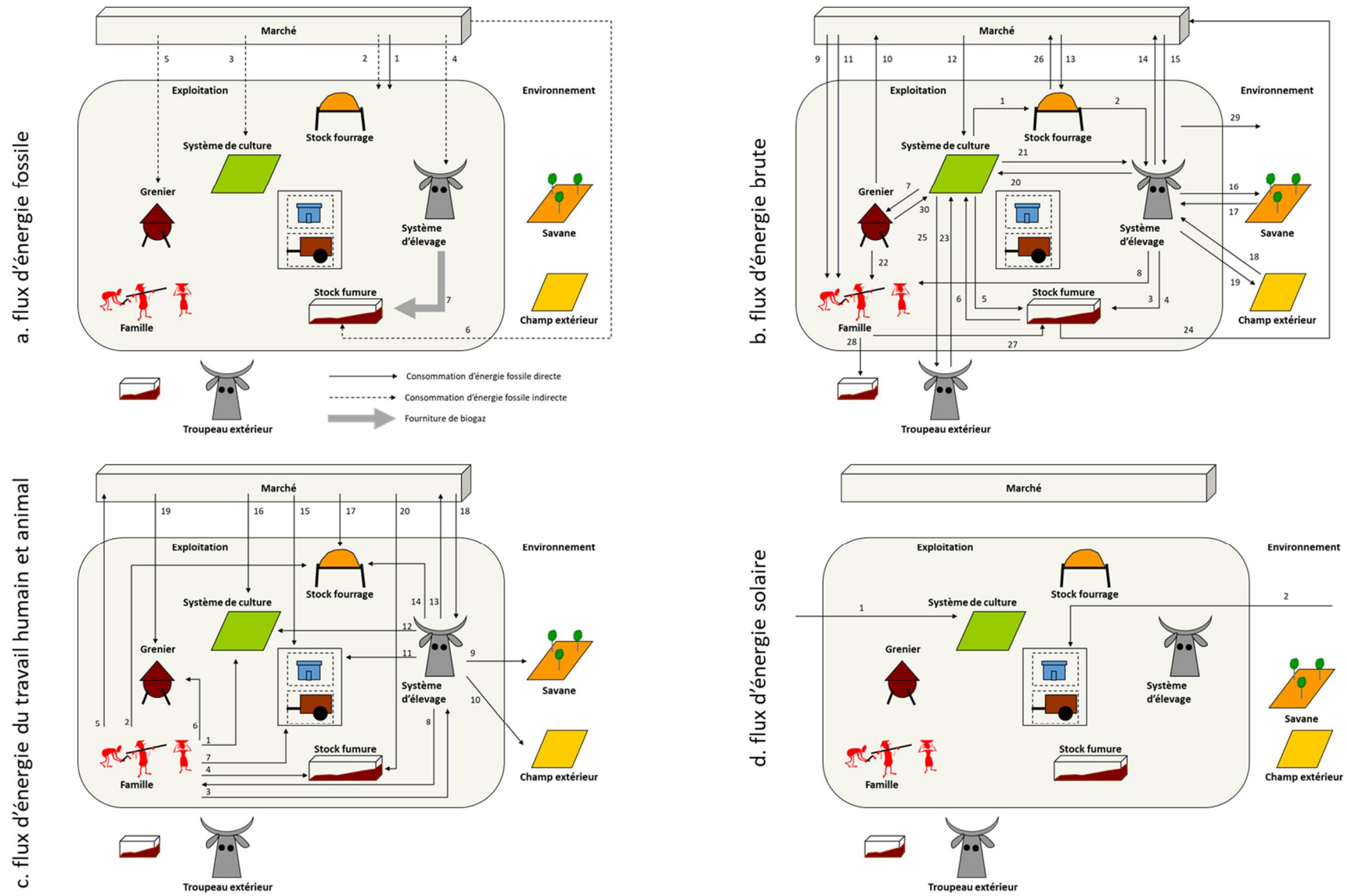


Figure 14. Quatre modèles conceptuels des flux d'énergie brute, fossile, liée au travail humain et animal et solaire

Légende de la Figure 14 :

Figure a. Modèle conceptuel des flux d'énergie fossile : EF1. Consommation d'énergie directe (essence, gasoil, gaz, électricité) ; EF2. Consommation indirecte pour la construction du matériel et des bâtiments ; EF3. Consommation indirecte via les intrants agricoles (semences, complexe NPK, urée, herbicides, insecticides, fumure organique, etc.) ; EF4. Consommation d'énergie indirecte de fourrage par vaine pâture externe de déjection animales par dépôt de troupeau extérieur ; EF5. Consommation indirecte via l'achat des produits pour l'alimentation humaine issus de l'industrie (sucre, huile, etc.) ; EF6. Consommation indirecte via les intrants sur les fosses (Burkina Phosphate, compost +, etc.) ; EF7. Allocation d'énergie indirecte du matériel et bâtiments sur les cultures ; EF8. Allocation d'énergie indirecte du matériel et bâtiments sur les troupeaux ; EF9. Allocation d'énergie indirecte du matériel et bâtiments sur le stockage de la fumure organique ; EF10. Allocation d'énergie indirecte des bâtiments pour le logement de la famille ; EF11. Consommation d'énergie indirecte d'aliments par la famille ; EF12. Achat de fourrage et stockage sur le hangar ; EF13. Consommation d'énergie indirecte de fourrage par vaine pâture externe ; EF14. Production de biogaz à partir des déjections animales ; EF15. Consommation indirecte via les intrants d'élevage (aliments concentrés, complexe minéraux et vitaminique, produits vétérinaires, etc.).

Figure b. Modèle conceptuel des flux d'énergie brute : EB1. Stockage des résidus de cultures ; EB2. Distribution d'aliments et fourrage aux animaux ; EB3. Déjections animales ; EB4. Refus de fourrage par les animaux ; EB5. Biomasse végétale vers les fosses ; EB6. Épandage de la fumure organique ; EB7. Stockage des productions agricoles ; EB8. Productions animales autoconsommées ; EB9. Achat de productions alimentaires ; EB10. Vente de productions agricoles ; EB11. Achat de produits non alimentaires (ex. bois) ; EB12. Achat d'intrants agricoles (fumure, engrais et produits phytosanitaires) ; EB13. Achat pour l'alimentation des animaux ; EB14. Vente de produits animaux ; EB15. Achat d'animaux ; EB16. Dépôt de déjections animales sur les parcours par le troupeau ; EB17. Consommation de fourrages sur les parcours par le troupeau ; EB18. Consommation des résidus sur les champs extérieurs par le troupeau ; EB19. Dépôt des déjections animales sur les champs extérieurs par le troupeau ; EB20. Dépôt des déjections animales sur les champs par le troupeau ; EB21. Consommation des résidus sur les champs par le troupeau ; EB22. Consommation des productions agricoles par la famille ; EB23. Dépôt des déjections animales par des troupeaux extérieurs sur les champs ; EB24. Vente de fumure organique ; EB25. Prélèvements de résidus de culture des champs par des troupeaux extérieurs ; EB26. Vente des résidus de culture ; EB27. Ordures ménagères produite par la famille ; EB28. Dépôts des fèces et urines de la famille dans les latrines ; EB29. Animaux morts et volés ; EB30. Prélèvement de productions agricoles comme semences.

Figure c. Modèle conceptuel des flux d'énergie liées au travail humain et animal : ET1. Main d'œuvre familiale mobilisée sur les champs (épandage de FO, labour, semis et resemis, traitement insecticide, désherbage, buttage, sarclage, etc.) ; ET2. Main d'œuvre familiale mobilisée pour le stockage du fourrage (récolte, mise en bottes, transport, etc.) ; ET3. Main d'œuvre familiale mobilisée pour la conduite des troupeaux (abreuvement, affouragement, traite, conduite au pâturage etc.) ; ET4. Main d'œuvre familiale mobilisée pour la production de FO (remplissage, retournement, vidange, etc.) ; ET5. Main d'œuvre familiale travaillant à l'extérieur de l'exploitation ; ET6. Main d'œuvre familiale mobilisée pour le stockage des produits végétaux ; ET7. Main d'œuvre familiale mobilisée pour la construction des bâtiments et la conduite du matériel (tracteurs) ; ET8. Travail animal pour le transport de la main d'œuvre au champ ; ET9. Energie dépensée par les hommes suivant les animaux au cours du pâturage sur les parcours naturels ; ET10. Energie dépensée par les hommes suivant les animaux au cours du pâturage sur les champs extérieurs ; ET11. Travail animale pour la construction des bâtiments ; ET12. Travail animal pour les travaux champêtres (labour, buttage, sarclage) ; ET13. Location du travail animal sur le marché (labour, sarclage, buttage des champs extérieurs) ; ET14. Travail animal pour le stockage des résidus de culture et de fourrages ; ET15. Main d'œuvre extérieure pour la construction des bâtiments et la conduite du matériel (tracteur) ; ET16. Main d'œuvre extérieure mobilisée sur les champs (épandage de FO, labour, semis, resemis, traitement insecticide, désherbage, buttage, sarclage etc.) ; ET17. Main d'œuvre extérieure mobilisée pour le stockage de résidus de culture et du fourrage (récolte, mise en bottes, transport...). ET18. Main d'œuvre extérieure pour la conduite du troupeau (abreuvement, alimentation, traite, conduite au pâturage) ; ET19. Main d'œuvre extérieure pour le stockage des récoltes ; ET20. Main d'œuvre extérieure la production de FO (remplissage, retournement, vidange, etc.).

Figure d. Modèle conceptuel des flux d'énergie solaire : ES1. Radiation solaire (photosynthèse) ; ES2. Radiation solaires reçue par les installations pour produire de l'énergie renouvelable (panneau solaire). .

2.2.5.2. Application de l'analyse pluri-énergie

L'analyse pluri-énergie s'organise en cinq étapes successives (Figure 15) :

La première étape consiste à lister les flux d'énergies propres au système étudié parmi les 67 flux génériques (Figure 14).

La seconde étape consiste à **calculer les coefficients énergétiques** des flux entrants, internes et sortants pour les quatre formes d'énergies étudiées (fossile, brute, travail et solaire). L'adaptation au contexte de l'étude des coefficients énergétiques utilisés est une condition incontournable et nécessaire pour s'assurer de la fiabilité des résultats. En effet, la valeur numérique de ces coefficients varie suivant l'origine géographique des intrants ou la technique utilisée pour les produire. C'est le cas par exemple du coût en énergie fossile de l'électricité variant fortement suivant la matière première utilisée pour sa production (énergie nucléaire, charbon, hydraulique, solaire (voir annexe 2, Tableau XIX).

La troisième étape consiste à **collecter les données brutes sur l'exploitation**. Les données brutes collectées représentent les données de structure ou de fonctionnement des sept composantes du système étudié (infrastructures avec le matériel et les bâtiments, le troupeau, les surfaces cultivées, le grenier, le hangar, les fosses et la famille). Le questionnaire et le cahier de suivi sont présentés dans l'ANNEXE . Des détails sur les modalités de collecte de données sont présentés dans le paragraphe 2.3 (page 61).

La quatrième étape consiste à **transformer les données brutes collectées en flux d'énergies** (biomasse, durée des travaux, durée d'ensoleillement des cultures, quantité d'intrant fossile). Cela est rendu possible grâce à l'étape 2 et 3. Les données brutes collectées sont transformées en flux d'énergies en les multipliant par des coefficients énergétiques adaptés.

La cinquième étape correspond **au calcul des indicateurs énergétiques** pour les trois échelles d'analyse (exploitation, système de culture et d'élevage). Les indicateurs calculés sont classés en trois catégories : les consommations, les productions et les efficacités d'énergies. Les équations ayant servi à les établir sont consignées dans le Tableau IV.

Les consommations d'énergies totales (EF, EB, ET, ES) établies pour chaque forme d'énergie correspondent à la somme des flux d'énergies entrants pour chacune des formes. Elles sont notées CEF, CEB, CET et CES.

- La production d'énergie brute est la seule forme comptabilisée en flux sortant. La production d'EB totale correspond ainsi à la somme de tous les flux d'énergie brute sortant. Elle est notée PEB.
- L'efficacité énergétique est calculée à partir du rapport des consommations totales d'énergies et de la production d'énergie brute. Elle est notée EEF, EEB, EET et EES.

Ces trois catégories d'indicateurs sont calculées au niveau des trois échelles d'analyse (exploitation, système de culture et d'élevage). Pour les consommations et les productions, ils sont exprimés en MJ.ha⁻¹ à l'échelle de l'exploitation et des cultures et en MJ.UBT⁻¹ à l'échelle des troupeaux. Les indicateurs d'efficacité restent sans dimension. La Figure 15 illustre les 5 étapes de l'analyse pluri-énergie appliquée pour cette étude.

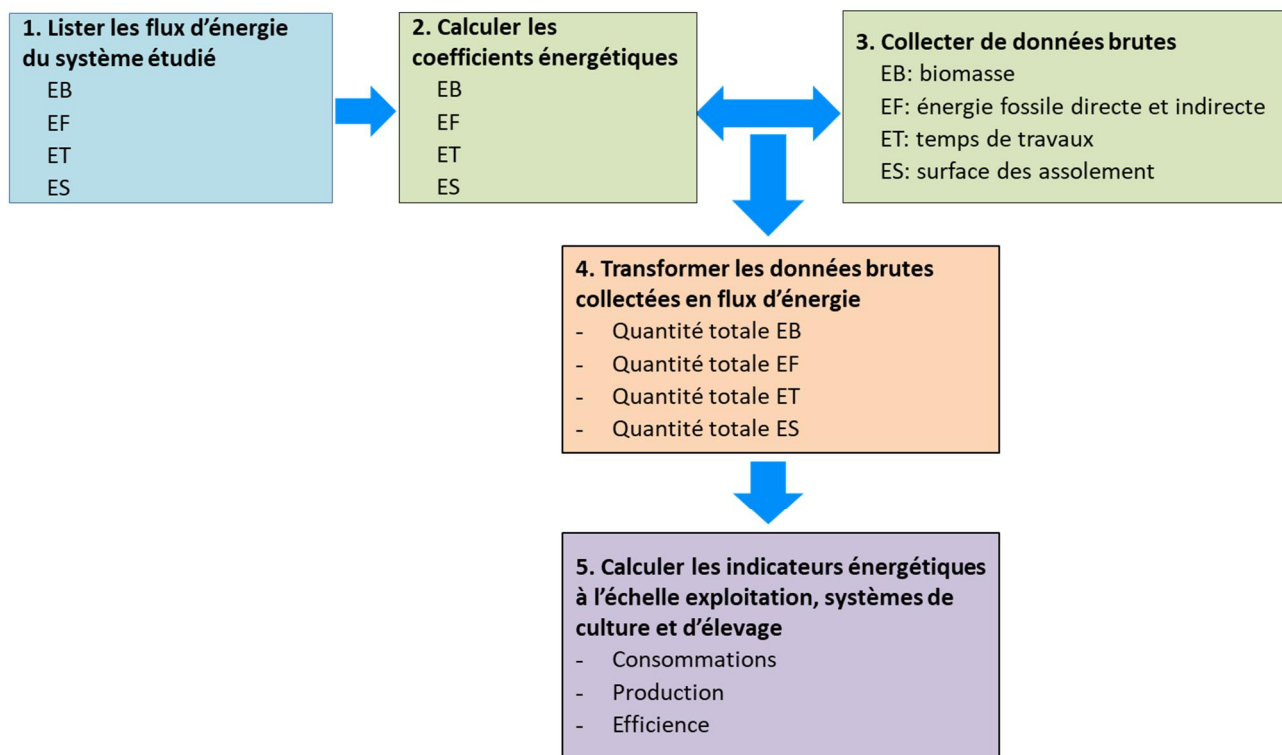


Figure 15. Cinq étapes pour appliquer l'analyse pluri-énergie

Tableau IV. Indicateurs et équations de calcul des indicateurs de l'analyse pluri-énergie à l'échelle de l'exploitation, des cultures et de l'élevage

Echelle	Equations	
Exploitation	$CEF_{Exploitation} (MJ.ha^{-1}) = EF_1 + EF_2 + EF_3 + EF_4 + EF_5 + EF_6 + EF_{11} + EF_{12} + EF_{13} + EF_{15}$	(1)
	$CEB_{Exploitation} (MJ.ha^{-1}) = EB_9 + EB_{11} + EB_{12} + EB_{13} + EB_{15} + EB_{17} + EB_{18} + EB_{23}$	(2)
	$CET_{Exploitation} (MJ.ha^{-1}) = ET_{15} + ET_{16} + ET_{17} + ET_{18} + ET_{19} + ET_{20}$	(3)
	$CES_{Exploitation} (MJ.ha^{-1}) = ES_1 + ES_2$	(4)
	$PEB_{Exploitation} (MJ.ha^{-1}) = EB_{10} + EB_{14} + EB_{16} + EB_{19} + EB_{24} + EB_{25} + EB_{26} + EB_{28} + EB_{29}$	(5)
	$EEF_{Exploitation} (Su) = PEB_{Exploitation} / CEF_{Exploitation}$	(6)
	$EEB_{Exploitation} (Su) = PEB_{Exploitation} / CEF_{Exploitation}$	(7)
	$EET_{Exploitation} (Su) = PEB_{Exploitation} / CEF_{Exploitation}$	(8)
	$EES_{Exploitation} (Su) = PEB_{Exploitation} / CEF_{Exploitation}$	(9)
Cultures	$CEF_{culture} (MJ.ha^{-1})$ $= EF_3 + EF_4 + EF_7$ $+ (EF_8 + EF_{13} + EF_{15}) X \frac{EB_{20} + ET_8 + ET_{12}}{EB_3 + EB_4 + EB_8 + EB_{14} + EB_{16} + EB_{19} + EB_{20} + EB_{29} + ET_8 + ET_{11} + ET_{12} + ET_{13} + ET_{14}} X \left(1 + \frac{EB_6}{EB_6 + EB_{24}} \right) + [(EF_6 + EF_9) X \frac{EB_6}{EB_6 + EB_{24}} + (EF_{10} + EF_{11}) \frac{ET_1}{ET_1 + ET_2 + ET_3 + ET_4 + ET_5 + ET_6 + ET_7 + ET_9 + ET_{10}}]$	(10)
	$CEB_{Culture} (MJ.ha^{-1}) = EB_6 + EB_{12} + EB_{20} + EB_{23} + EB_{30}$	(11)
	$CET_{Culture} (MJ.ha^{-1}) = ET_1 + ET_8 + ET_{12} + ET_{16}$	(12)
	$CES_{Culture} (MJ.ha^{-1}) = ES_1$	(13)
	$PEB_{Culture} (MJ.ha^{-1}) = EB_1 + EB_5 + EB_7 + EB_{21} + EB_{25}$	(14)
	$EEF_{Culture} (Su) = PEB_{Culture} / CEF_{Culture}$	(15)
	$EEB_{Culture} (Su) = PEB_{Culture} / CEF_{Culture}$	(16)
	$EET_{Culture} (Su) = PEB_{Culture} / CEF_{Culture}$	(17)
	$EES_{Culture} (Su) = PEB_{Culture} / CEF_{Culture}$	(18)
Elevage	$CEF_{Elevage} (MJ.ha^{-1})$ $= EF_8 + EF_{13} + EF_{15} + (EF_3 + EF_4 + EF_7) X \frac{EB_{21}}{EB_1 + EB_5 + EB_7 + EB_{21} + EB_{25}} X \left(1 + \frac{EB_2}{EB_2 + EB_{26}} \right) + EF_{12} \frac{EB_2}{EB_2 + EB_{26}} + (EF_{10} + EF_{11}) \frac{ET_3 + ET_9 + ET_{10}}{ET_1 + ET_2 + ET_3 + ET_4 + ET_5 + ET_6 + ET_7 + ET_8 + ET_{10}}$	(19)
	$CEB_{Elevage} (MJ.ha^{-1}) = EB_2 + EB_{15} + EB_{17} + EB_{18} + EB_{21}$	(20)
	$CET_{Elevage} (MJ.ha^{-1}) = ET_3 + ET_9 + ET_{10} + ET_{18}$	(21)
	$PEB_{Elevage} (MJ.ha^{-1}) = EB_3 + EB_4 + EB_8 + EB_{14} + EB_{16} + EB_{19} + EB_{20} + EB_{29}$	(22)
	$EEF_{Elevage} (Su) = PEB_{Elevage} / CEF_{Elevage}$	(23)
	$EEB_{Elevage} (Su) = PEB_{Elevage} / CEF_{Elevage}$	(24)
	$EET_{Elevage} (Su) = PEB_{Elevage} / CEF_{Elevage}$	(25)

2.3. COLLECTE DES DONNEES

La collecte des données s'est déroulée en deux temps : une phase d'enquête puis une phase de suivi.

2.3.1. Phase d'enquête des exploitations

Les enquêtes ont concerné les huit exploitations de l'échantillon. Les informations collectées pendant cette phase ont concerné la période s'étalant de mai 2012 à avril 2013. Les enquêtes des exploitations proprement dites ont été faites en avril 2013, en un passage unique. Les enquêtes visaient le chef d'exploitation. Elles étaient déclaratives, sans mesures et avaient une durée moyenne de deux heures par exploitation.

Un questionnaire (annexe 3) a servi à structurer les entretiens et consigner les informations collectées. Le questionnaire était structuré en sept rubriques en référence aux composantes du système et aux activités décrites par le modèle conceptuel de la Figure 14 : les caractéristiques structurelles et la composition des ménages, le système d'élevage, le système de cultures, la gestion des stocks de produits agricoles et des sous-produits, et la production de fumure organique.

La phase d'enquête avait pour but de préparer la phase de suivi, afin de s'assurer de la prise en compte de toutes les informations au cours du suivi. L'enquête donne un mapping de l'exploitation en un moment donné alors que le suivi donne les informations de manière échelonnée au cours du temps. L'aperçu de la structure et du fonctionnement des exploitations permis par l'enquête, a facilité la mise en place du dispositif de suivi sur l'exhaustivité des flux d'énergies pris en compte.

2.3.2. Phase de suivi des exploitations

Les informations collectées pendant le suivi ont concerné les huit exploitations soumises à la phase d'enquête. Le suivi s'est étalé sur une période de vingt (20) mois, de mai 2013 à décembre 2014.

Un livret de suivi a été élaboré pour consigner les informations recueillies sur chaque exploitation. Il s'articulait autour de 7 rubriques : les caractéristiques structurelles 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.

Ce livret n'est que la réadaptation dans le temps du questionnaire d'enquête permettant de renseigner mois après mois, les données sur les flux d'énergies au sein des exploitations. Le livret de suivi est présenté dans l'annexe 3.

Toutes les informations de l'exploitation n'étant pas disponibles au même moment, le dispositif de suivi a permis de distinguer les différents flux en fonction de la période d'apparition, leur

fréquence, la nature de la collecte (mesure, déclaration ou estimation ; voir annexe 2, Tableau XVII). La fréquence moyenne de passage dans chaque exploitation était hebdomadaire.

Les discussions pendant le suivi ont concerné soit le chef d'exploitation, soit ses femmes ou encore son berger en fonction de la nature des informations à collecter. Les femmes étaient enquêtées sur la production laitière, les activités ménagères, les bergers sur la conduite du troupeau et les chefs d'exploitations sur les autres activités.

2.3.2.1. Principes communs au suivi et à l'enquête pour la collecte des données des quatre formes d'énergies

Pour assurer une collecte exhaustive des flux nécessaires aux analyses à mener, le questionnaire d'enquête et le livret de suivi ont été élaborés sur la base des quatre modèles conceptuels (Figure 14). Pour chaque rubrique, il était prévu de noter simultanément les informations liées aux quatre formes d'énergies (Figure 14). Par exemple, les informations nécessaires pour quantifier les flux d'énergie brute sur la mise en place de la culture du maïs sont la quantité de semence de maïs semée et la quantité de FO achetée et épandue. Pour la même activité, les flux d'énergie fossile seront renseignés par la quantification des apports en pesticides et engrais alors que les flux d'énergie du travail s'intéresseront au nombre de personnes impliquées dans les travaux de labour, de buttage etc. Pour quantifier les flux d'énergie solaire, la surface et la durée d'ensoleillement du maïs sont nécessaires (durée du semis à la maturation de la graine). Cet exercice a été conduit pour toutes les activités de la ferme, ce qui a rendu la collecte des données très complexe.

2.3.2.2. Dispositif mis en place pour la collecte de données par suivi des quatre formes d'énergies

Un dispositif spécial a été mis en place pour le suivi des exploitations. Un chronogramme a été calqué sur la base du calendrier agricole afin de suivre les périodes de mise en œuvre des différentes activités. Le programme de passage dans les exploitations pour le suivi des flux visait à renseigner les flux de manière mensuelle mais s'est appuyé sur un passage hebdomadaire dans les exploitations. Nous avons adopté trois manières de collecter les données : directement par des mesures sur le terrain, indirectement par déclaration d'un membre de l'exploitation, ou estimation pour les flux les plus complexes (Tableau V).

Tableau V. Différents flux mesurés, déclarés ou estimés par forme d'énergie

	Flux mesurés	Flux déclarés	Flux estimés
Energie fossile	EF ₂ ; EF ₃ ; EF ₇ ; EF ₈ ; EF ₉ ; EF ₁₀ ; EF ₁₅	EF ₁ ; EF ₅ ; EF ₆ ; EF ₁₁ ; EF ₁₂ ;	EF ₁₃ ; EF ₁₄ ; EF ₄
Energie brute	EB ₁ ; EB ₂ ; EB ₃ ; EB ₄ ; EB ₆ ; EB ₇ ; EB ₁₁ ; EB ₂₇	EB ₅ ; EB ₈ ; EB ₉ ; EB ₁₀ ; EB ₁₂ ; EB ₁₃ ; EB ₁₄ ; EB ₁₅ ; EB ₂₂ ; EB ₂₄ ; EB ₂₆ ; EB ₂₉ ; EB ₃₀	EB ₁₆ ; EB ₁₇ ; EB ₁₈ ; EB ₁₉ ; EB ₂₀ ; EB ₂₁ ; EB ₂₃ ; EB ₂₅ ; EB ₂₈
Energie du travail	ET ₁ ; ET ₃ ; ET ₄ ; ET ₁₂ ; ET ₁₆ ; ET ₁₈ ; ET ₂₀	ET ₂ ; ET ₅ ; ET ₆ ; ET ₇ ; ET ₈ ; ET ₉ ; ET ₁₀ ; ET ₁₁ ; ET ₁₃ ; ET ₁₄ ; T ₁₅ ; ET ₁₇ ; ET ₁₉	
Energie solaire		ES ₁ ; ES ₂	ES ₁ ; ES ₂

❖ Collecte des données d'énergie fossile

Les données **mesurées** concernant l'énergie fossile sont des intrants se trouvant sous différentes formes : sous forme de biomasse (EF₃, et EF₁₅), de matériel et bâtiments (EF₂, EF₇ ; EF₈, EF₉ et EF₁₀), ou sous forme d'engrais pour la fertilisation (EF₃). La fabrication ou le transport de l'ensemble de ces intrants ont nécessité une consommation d'énergie fossile (pétrole, électricité), qui implique une consommation d'EF indirecte par l'exploitation.

Les données d'énergie fossile **déclarées** sont les animaux achetés, les aliments achetés au profit des humains (EF₅ et EF₁₁) et des animaux (EF₉), les quantités de carburant (composés purement carbonées ; EF₁) nécessaires pour faire fonctionner le matériel. Pour les produits phytosanitaires et les engrais, leur composition chimique a été relevée (EF₃), pour les produits vétérinaires (EF₁₅), le coût de l'opération a été reporté, pour les concentrés alimentaires et les fourrages achetés (EF₄ et EF₁₂) et les intrants sur les fosses (EF₆).

Les données d'énergie fossile **estimées** sont les fourrages consommés par vaine pâture externe (EF₁₃). Les déjections animales déposées lors de vaine pâture de troupeaux extérieurs (EF₄) et la production de biogaz (EF₁₄).

La collecte de la biomasse étant déjà abordée par l'énergie brute, il n'est plus nécessaire de déterminer la quantité déjà déterminée par l'énergie brute. Il a fallu donc compléter les informations avec leur origine. Cependant, le matériel et les bâtiments ont été décrits en prenant en compte le type de matériaux utilisé pour leur construction, la superficie de chaque bâtiment déterminée à l'aide des dimensions, la description de chaque matériel utilisé, la quantité déjà disponible lors de sa prise en compte par l'énergie brute.

A l'issue de la collecte de toutes ces informations, les coefficients énergétiques fossiles sont calculés et appliqués aux quantités de chaque intrant fossile pour obtenir les quantités de flux d'énergie fossile. Les coefficients énergétiques fossiles utilisés dans cette étude sont

présentés, avec leurs références dans l'annexe 2 (Tableau XIX, Tableau XX, Tableau XXI, Tableau XXII, Tableau XXIII et Tableau XXIV).

❖ Collecte des données d'énergie brute

Les flux d'énergie brute **mesurés** dans les exploitations au moment de leur mise en œuvre sont : le stockage (EB₁) et la distribution des fourrages (EB₂), la production de déjections animales (EB₃), des refus de fourrage (EB₄) et l'épandage de fumure organique (EB₆), le stockage des produits agricoles (EB₇), la consommation de produits non alimentaires tel que le bois par la famille (EB₁₁) et la production d'ordures ménagères par la famille (EB₂₇).

- Les quantités de biomasse manipulées pour ces activités ont été pesées avec des pesons adaptés (5 à 200 kg) suivant une fréquence variable selon les flux (3 jours par mois pour les flux EB₂, EB₃, EB₄ et EB₁₁ et 1 à 5 jours par an pour les flux EB₁, EB₆ et EB₇). La mesure de la distribution des fourrages (EB₂) 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 (EB₃) étaient ramassées et pesées séparées des refus d'affouragement (F₄) pour chaque lot. L'évaluation de la teneur en matière sèche des biomasses a été réalisée sur les fourrages, les déjections animales et les refus.
- La mesure de la consommation de bois de feu (EB₁₁) a consisté à la pesée d'une certaine quantité de bois le jour du passage du technicien qui permettrait de couvrir les besoins des ménages sur une période d'une semaine. Trois jours après, une visite du technicien était prévue pour une pesée de la quantité de bois restant, ce qui permet de calculer la consommation journalière. La mesure a été répétée à plusieurs reprises.
- La mesure de la production d'ordures ménagères (EB₂₇) a consisté à recueillir séparément la quantité de cendre produite sur trois jours et la quantité des autres déchets ménagers produits. Les déchets ménagers sont ensuite triés pour séparer les matières dégradables, non dégradables et le sable.

Les flux d'énergie brute **déclarés** sont : (i) l'achat de produits alimentaires (EB₉), d'intrants agricoles (EB₁₂), d'aliment bétail (EB₁₃) et d'animaux (EB₁₅) ; (ii) de la vente des produits agricoles et animaux (EB₁₀ et EB₁₄), de fumure organique (EB₂₄), de résidus de culture (EB₂₆) et le vol ou la mort d'animaux (EB₂₉) et (iii) de l'autoconsommation des animaux et des produits agricoles (EB₈ et EB₂₂), des semences (EB₃₀) et de la biomasse végétale pour remplir les fosses (EB₅).

Les flux d'énergie brute **estimés** correspondent à la quantité de fourrage ingérée sur les parcours (EB₁₇, EB₁₈, EB₂₁ et EB₂₅) et la quantité de déjection animales déposée sur les

parcours (EB₁₆, EB₁₉, EB₂₃ et EB₂₀) ou de déjections humaines déposées dans les latrines (EB₂₈). Ces flux 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 distribués 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 ; pour plus de détails voir l'annexe 2 (Tableau XVI).

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 animales 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.

Pour mieux comprendre les calculs des flux d'énergie brute, la fréquence de collecte, le matériel ayant servi aux mesures et les formules utilisées pour les estimations, voir l'annexe 2 (Tableau XVI et Tableau XVII).

A l'issue de la collecte de toutes ces informations, les coefficients énergétiques brutes (contenue calorifique de chaque composé organique) sont obtenus dans la littérature, et, appliqués aux quantités de chaque composé organique pour obtenir les quantités de flux d'énergie brute. Les coefficients énergétiques brutes utilisés dans cette étude sont présentés, avec leurs références en annexe 2 (Tableau XVIII).

❖ Collecte des données d'énergie liée au travail

Une activité donnée menée sur l'exploitation peut être source de flux d'énergies des quatre formes d'énergies simultanément. Chaque activité agricole menée a impliqué une collecte des données d'ET à la période d'apparition et selon une fréquence de collecte identique à celle des données d'EB. Par exemple, le semis utilise des semences (contient de l'énergie brute) qui est le résultat d'une culture précédente ayant consommée des engrais (énergie fossile indirecte). L'acte de semer crée du travail (dépende de l'énergie du travail). Le cycle de développement de la plante nécessite l'absorption de rayonnement solaire (énergie solaire).

La collecte des données concernant le travail fourni par les hommes et les animaux s'est appuyé sur l'usage d'un chronomètre pour mesurer les temps de travaux de certaines activités. Les informations collectées sont la durée, l'espèce « homme » ou « animaux », le nombre, le type (le genre et âge ou chez les animaux espèce - bovin ou asin) et l'origine des hommes ou des animaux (famille ou extérieur).

Les travaux chronométrés (**mesurés**) sont les travaux effectués par les humains et animaux sur les champs pour l'épandage de fumure organique, le labour, le semis et resemis, le traitement phytosanitaire, le désherbage, le buttage et le sarclage (ET₁ ; ET₁₂ et ET₁₆), le travail par les humains pour l'entretien des animaux à la concession à travers l'abreuvement, la distribution du fourrage à l'étable, la traite des vaches, le nettoyage de l'étable (ET₃ et ET₁₈) et le travail effectué par les humains pour la production de fumure organique (ET₄ et ET₂₀).

Les travaux humains et animaux **déclarés** sont les travaux de stockage de résidus de culture et des grains et leur transport des champs en concession (ET₂ ; ET₆ ; ET₁₃ ; ET₁₄ ; ET₁₇ et ET₁₉), le travail des humains et des animaux pour la construction des bâtiments et conduite de certains matériaux (ET₇ ; ET₁₁ ; ET₁₅) ; le transport de la main d'œuvre au champ (ET₈), le travail des humains et des animaux à l'extérieur (ET₅ et ET₁₃) et dépense énergétique des hommes lors du suivi des animaux au pâturage (ET₉ et ET₁₀).

A l'issue de la collecte des données, les coefficients énergétiques du travail (quantité d'énergie dépensée par un humain ou un animal pour réaliser chacune des activités) sont obtenus de la littérature. Les coefficients énergétiques du travail utilisés dans cette étude sont présentés, avec leurs références en annexe 2 (Tableau XXV).

❖ Collecte des données d'énergie solaire

Le calcul des quantités d'énergie solaire reçues par les cultures nécessite l'inventaire des différentes soles de l'exploitation. Les surfaces mises en culture ont été mesurées à l'aide de GPS ou déclarées par le producteur. La durée d'ensoleillement des cultures emblavées a été obtenue dans la littérature ou à dire d'acteurs (ex : 120 jours pour la culture du maïs), de même que la longueur d'ondes utilisée pour la photosynthèse. Ces données permettent d'estimer les quantités d'énergie solaire mobilisées par les cultures pour la production agricole.

2.3.2.3. Période à considérer pour l'exploitations des données

Dans les exploitations agricoles, le cycle des activités est d'un an et la campagne agricole est le signal du début des activités. Le bilan énergétique d'une exploitation agricole se réalise à l'échelle d'une année (Bochu, 2002). Pour cette étude, la collecte des données a duré plus d'une année afin de prendre en compte le fait que certains flux d'énergies de l'année *n* dépendent largement de ceux de l'année *n-1* et influent ceux de l'année *n+1*. Ainsi, les données collectées entre mai 2013 et avril 2014 ont été utilisées pour les analyses à l'exception de celles concernant la fumure organique et la consommation par la famille de produits agricoles issus du grenier.

En effet, la fumure organique est produite à partir de matières premières issues de la campagne agricole précédente (n-1 ; EB3 et EB4) et est utilisée pendant la campagne agricole suivante (n+1 ; EB6). Ne disposant pas de données sur la production de résidus de culture et de déjections animales de la campagne précédant le suivi, nous avons émis l'hypothèse que les pratiques et le niveau de production et d'utilisation de la fumure organique étaient équivalents 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 (EB22). Ces hypothèses ont été validées auprès de ces 8 exploitations étudiées en 2013 (Bénagabou *et al.*, 2013). Les données utilisées proviennent donc d'un suivi de 18 mois, mais l'analyse est réalisée sur 12 mois.

2.4. ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNEES

Le traitement des données a été essentiellement fait sous le logiciel Excel 2013.

Les données collectées sur les énergies brute, fossile, travail et solaire ont été saisies dans une base de données commune. Toutefois, les données d'enquêtes et de suivi ont été traitées séparément dans deux bases de données distinctes. Les graphiques ont été réalisés sous Excel 2013.

Trois outils ont été mobilisés ou développés dans le cadre de ce travail sous Excel 2013 et ont permis d'analyser les données. Il s'agit de l'outil *PLANETE Savane* adapté aux exploitations de la zone par Bochu (2002), l'outil pluri-énergie (Vigne *et al.*, 2013) et l'outil *Ecological Network Analysis* (Rufino *et al.*, 2009b ; Finn, 1980) adapté aux cas des exploitations de polyculture-élevage dans le cas de ce travail. Ces outils ont été tous adaptés au contexte du Burkina Faso pour prendre en compte la spécificité des exploitations étudiées.

L'outil ***PLANETE Savane*** a été décrit dans le CHAPITRE II (page 36) et correspond à la première partie des résultats présentés dans le CHAPITRE III (page 69). Les données d'enquête et de suivi ont servi à l'obtention des données d'entrées. Des corrélations entre les variables ont été testées à travers des tests de corrélation de Pearson (sous XLSTAT 19.3). Le seuil de significativité était fixé à 5%. Cette partie a permis de répondre à l'hypothèse 1 « Analyser le lien entre les pratiques d'intégration agriculture-élevage et l'efficacité énergétique ».

Les résultats de l'usage de l'outil ***Ecological Network Analysis*** sont présentés dans le

CHAPITRE IV (page 90). Les données de suivi ont été utilisées pour les analyses. Cette partie a permis de répondre à l'hypothèse 2 « Analyser les différentes formes d'intégration agriculture-élevage en mobilisant différents types d'indicateurs de l'intégration agriculture-élevage ».

L'outil pluri-énergie adapté aux exploitations de l'étude a permis de construire le CHAPITRE V (page 111). Cette partie a permis de répondre à l'hypothèse 3 « Analyser la diversité de systèmes mixtes agriculture-élevage mobilisant différemment les différentes formes d'énergies ». Des descriptions plus précises notamment sur l'analyse des données sont indiquées dans les parties Matériel et Méthodes propres à chaque article constituant les chapitres de la partie Résultats.

²CHAPITRE III. Performance énergétique fossile des exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso : Rôle des pratiques d'intégration agriculture-élevage

Fossil energy performance of mixed farming farms in western Burkina Faso: Role of crop-livestock integration practices

Résumé :

Les impacts environnementaux des systèmes agricoles intensifs invitent à inventer des systèmes de production nouveaux, respectant les principes de l'intensification écologique, avec une production soutenue et un recours limité aux intrants fossiles. L'intégration agriculture-élevage gage de durabilité, pourrait améliorer l'efficacité énergétique fossile des exploitations. A partir de suivis et d'enquêtes de huit (8) exploitations de polyculture-élevage diversifiées de l'Ouest du Burkina Faso, nous proposons d'analyser l'effet des pratiques d'intégration agriculture-élevage sur leurs profils énergétiques (consommation d'énergie fossile, production d'énergie brute et efficacité énergétique fossile). L'intégration agriculture-élevage améliore l'efficacité énergétique fossile de ces exploitations à travers la production et les échanges entre exploitations de coproduits des systèmes agricoles et d'élevage (résidus de culture, déjections animales), sans réduction du recours aux intrants dans ces systèmes à bas niveau d'intrants. Le renforcement de l'autonomie fourragère et du recyclage des biomasses pour la production de fumure organique contribuerait à la durabilité de ces systèmes de production. L'analyse du recyclage de l'énergie brute au sein des exploitations intégrant agriculture et élevage et les différentes formes d'énergies mobilisées, au-delà de l'énergie fossile, paraît nécessaire pour comprendre l'effet de ces pratiques sur l'efficacité des exploitations de polyculture-élevage.

Mots clefs : intégration agriculture-élevage, efficacité énergétique fossile, traction animale, fumure organique, fourrage

Abstract:

The environmental impacts of intensive farming systems call for inventing new production systems that respect the principles of ecological intensification, with sustained production and

² Article à soumettre à la Revue Cahiers Agricultures

Auteurs, Authors :

Ida Ouèbounga Bénagabou^{1,2,3*}, Mélanie Blanchard^{3,2}, Valérie M.C. Bougouma-Yaméogo¹

¹ UNB, IDR, 01 B.P. 1091 Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

² CIRDES-USPAE, 01 B.P. 454 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

³ CIRAD, UMR SELMET, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. SELMET, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France.

Corresponding author Bénagabou Ouèbounga Ida., Tel : (+226) 70 00 15 61, E-mail : idadec@yahoo.fr

limited use of fossil inputs. The crop-livestock integration guarantees sustainability, could improve the fossil energy efficiency of farms. Based on follow-ups and surveys of 8 diversified crop-livestock farms in western Burkina Faso, we propose to analyze the effect of crop-livestock integration practices on their energy profiles (fossil energy consumption, gross energy production and fossil energy efficiency). The crop-livestock integration improves the fossil energy efficiency of these farms through the production and exchanges between co-product farms of agricultural and livestock systems (crop residues, animal dung), without reducing the use of inputs, in these low-input systems. Strengthening fodder autonomy and recycling biomass for organic manure production would contribute to the sustainability of these production systems. The analysis of the recycling of gross energy within crop-livestock systems and the various forms of energy mobilized, beyond fossil energy, seems necessary to understand the effect of these practices on efficiency.

Key words: crop-livestock integration, fossil energy efficiency, animal traction, organic manure, forage.

1. INTRODUCTION

Les impacts environnementaux graves des systèmes de production agricoles intensifs observés dans le monde imposent de renouveler les enjeux de l'agriculture mondiale. L'agriculture doit aujourd'hui permettre de produire des denrées accessibles au plus grand nombre, de fournir des revenus dignes aux paysans, tout en utilisant moins de ressources et en limitant les effets négatifs sur l'environnement. Les systèmes de production à inventer doivent respecter les principes d'une intensification écologique (Griffon, 2010).

La poursuite de la croissance démographique dans la majeure partie des pays d'Afrique (Nations Unies, 2014), l'augmentation plus forte de la population urbaine, et le changement de mode de consommation observé en Afrique vers une consommation plus forte de produits animaux (lait, viande ; Rae *et al.*, 2010) impliquent de s'interroger sur la place des systèmes d'élevage dans les systèmes de production, quand les activités d'élevage sont par ailleurs indexées des pires impacts sur l'environnement (émission de gaz à effet de serre, consommation d'espace et de ressources nécessaires à l'alimentation humaine, emprise sur la ressource en eau etc. Steinfeld *et al.*, 2006 ; Gerber *et al.*, 2014).

Longtemps promues par les sociétés cotonnières en Afrique de l'Ouest pour ses effets sur la productivité et la durabilité des systèmes agricoles, les pratiques d'intégration agriculture-élevage n'ont cependant pas tout de suite retenu l'intérêt des paysans (Landais et Lhoste, 1990). L'intégration agriculture-élevage repose sur trois piliers biotechniques permettant des échanges entre le système agricole et le système d'élevage avec la traction animale, la production de fumure organique et la production et/ou stockage de fourrage. Elle est

aujourd'hui largement adoptée en Afrique de l'Ouest (Dugué *et al.*, 2004 ; Lhoste 2004 ; Vall *et al.*, 2006a). La traction animale, principalement bovine et asine, s'est développée avec l'acquisition d'animaux de trait et d'équipement agricole subventionnés par les sociétés cotonnières. Elle permet d'améliorer le temps et la précision de la préparation des sols, l'entretien des cultures et le transport des récoltes, des intrants et des biomasses (Vall *et al.*, 2003 ; Lhoste *et al.*, 2010). La production de fumure organique, pratique plus récente, se fait à travers une diversité de mode de production et de biomasses mobilisées (Berger *et al.*, 1987 ; Blanchard, 2010 ; Landais *et al.*, 1993 ; Blanchard *et al.*, 2014 ; 2017). Les cultures fourragères se développent aujourd'hui dans les exploitations de l'Ouest du Burkina Faso avec initialement, le stockage de résidus de culture (pailles de céréales, fanes de légumineuses), de foin de brousse et la mise en place de cultures fourragères chez quelques exploitations pionnières (Klein *et al.*, 2014).

L'intensification conventionnelle de l'agriculture dans le monde s'appuie sur une forte consommation d'énergie fossile (mécanisation agricole, recours aux insecticides, herbicides et engrais) (Bochu, 2002; Bonny, 2010) ; source de pollution de l'environnement (Pachauri et Reisinger, 2007) et de dépendance économique. Des études préalables sur l'effet des pratiques d'intégration agriculture-élevage sur les bilans énergétiques des exploitations de polyculture-élevage (Bénagabou, 2011 ; 2013 ; Bénagabou *et al.*, 2013) avaient permis de montrer que l'intégration agriculture-élevage semblait améliorer l'efficacité énergétique fossile des exploitations, alors que l'intensification agricole conventionnelle semblait diminuer cette efficacité énergétique. Ces études invitent à analyser l'effet de la diversité des pratiques mises en œuvre dans les exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso sur leur efficacité énergétique fossile afin d'analyser en quoi ces pratiques pourraient participer à l'intensification écologique des systèmes de polyculture-élevage d'Afrique de l'Ouest.

Nous formulons ainsi l'hypothèse que les pratiques d'intégration agriculture-élevage améliorent l'efficacité énergétique fossile selon différents processus.

- La traction animale devrait améliorer l'efficacité énergétique fossile en améliorant la productivité agricole (meilleur entretien des cultures) tout en limitant le recours à la consommation d'énergie fossile (moins motorisation, moins consommation d'herbicide et de main d'œuvre extérieure).
- Le stock fourrager devrait améliorer la productivité du système d'élevage à travers une meilleure couverture des besoins alimentaires des animaux et réduire les consommations d'aliment extérieur, améliorant ainsi l'efficacité énergétique fossile des exploitations.

- La production de fumure organique devrait limiter les consommations d'énergie fossile par une diminution des engrais minéraux utilisés, permettre une amélioration des productions agricoles et de l'efficacité énergétique fossile.

A travers l'étude des profils énergétiques (consommation d'énergie fossile, production d'énergie brute) et des pratiques d'intégration agriculture-élevage d'une diversité d'exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso, l'article propose d'analyser la diversité des pratiques d'intégration agriculture-élevage mise en œuvre dans les exploitations et les profils énergétiques de ces exploitations et d'étudier l'effet de ces pratiques sur les consommations d'énergie fossile, les productions d'énergie brute et l'efficacité énergétique fossile des exploitations.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. La zone cotonnière ouest du Burkina Faso

L'étude a été conduite à Koumbia, un village représentatif de la zone cotonnière de l'Ouest du Burkina Faso. C'est une zone majeure de l'élevage agropastoral et une zone principale de production agricole pour le pays (céréales et coton). Il est situé (latitude 12°42'207", longitude 4°24'010") dans la province du Tuy qui connaît un climat soudano-guinéen avec une saison des pluies (mai à octobre, 1000 mm/an), une saison sèche froide (octobre à février) et une saison sèche chaude (mars à avril). Le territoire villageois subit de fortes densités humaines (55 habitants.km⁻²) et animales (48 UBT.km⁻² ; UBT : unité bovin tropical) et une importante emprise agricole avec 53% du territoire mis en culture (Vall *et al.*, 2006b) entraînant de fortes compétitions pour l'usage des ressources et des espaces entre les activités agricole et d'élevage et entre les usagers.

2.2. Les exploitations de polyculture-élevage étudiées

Une typologie des exploitations de polyculture-élevage existant dans la zone est largement utilisée pour les travaux de recherche sur l'intégration agriculture-élevage (Vall *et al.*, 2006a ; 2011). Elle propose trois (03) types d'exploitation : (i) *les agriculteurs* (A) principalement orientés vers les productions agricoles avec du coton et des céréales destinés à la vente et à l'autoconsommation et possédant un petit noyau d'élevage (<10 bovins) ; (ii) *les éleveurs* (E) orientés vers les productions animales avec un troupeau de bovins (> 10 à plus de 110 bovins) et cultivant des surfaces agricoles plus réduites principalement en céréales (<7,5 ha) et (iii) *les agro-éleveurs* (AE) 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).

L'étude a été conduite sur huit (08) exploitations représentatives de la diversité des pratiques d'intégration agriculture-élevage existante dans la zone d'étude et appartenant aux trois (03) types d'exploitation reconnus : 3 agriculteurs, 2 agro-éleveurs et 3 éleveurs. Les données ont été collectées pour deux campagnes agricoles dans les exploitations : par enquête (2012-2013) et par un suivi (2013-2014). Le choix du village et des exploitations étudiées se base sur la disponibilité de données préexistantes et d'une expertise sur les flux de biomasses (Bénagabou *et al.*, 2013 ; 2017 ; Vall *et al.*, 2006a ; 2011).

2.3. Analyse des pratiques d'intégration agriculture-élevage

L'analyse des pratiques d'intégration agriculture-élevage, des consommations d'énergie fossile et de la production d'énergie brute par les exploitations de polyculture-élevage a été réalisée sur deux campagnes agricoles (2012-13 et 2013-14) par enquête auprès du chef d'exploitation et par suivi des pratiques mises en œuvre. Des indicateurs décrivant les pratiques d'intégration agriculture-élevage ont été calculés à partir des indicateurs proposés par Bénagabou *et al.* (2013), en référence aux trois piliers d'intégration : la couverture des besoins en traction animale (CBTA), la couverture des besoins en fumure organique (CBFO) et la couverture des besoins fourragers (CBF). Ces indicateurs sont synthétisés en un indicateur global de l'intégration agriculture-élevage (IG).

$CBFO (\%) = \text{Quantité de fumure organique épandue (kg)} / 2500 \text{ (kg/ha)} * \text{surface cultivée (ha)}$

$CBF (\%) = \text{Quantité de fourrage stocké (kg)} / 6,25 \text{ kg MS/UBT/jours} * 365 \text{ jours} * \text{nombre d'UBT}$

$CBTA (\%) = \text{Nombre de paire de bœuf de trait} / \text{surface cultivée (ha)} / 5 \text{ (ha par paire de bœufs)}$

$IG (\%) = (CBTA + CBF + CBFO) / 3$

Avec MS=Matière sèche ; UBT=Unité Bovin Tropical

2.4. Analyse des profils énergétiques des exploitations de polyculture-élevage et de leur efficience énergétique fossile

Les profils énergétiques des exploitations de polyculture-élevage ont été analysés à travers un inventaire complet des productions d'énergie brute de l'ensemble de l'exploitation (du système de culture, du système d'élevage et de la famille) et de leurs consommations d'énergie fossile directe et indirecte sur une année, en suivant la méthode adaptée au contexte de l'Ouest du Burkina Faso par Bénagabou (2011, 2013).

Les productions d'énergie brute des exploitations de polyculture-élevage (en MJ.an⁻¹) sont les productions du système de culture (grains), les productions du système d'élevage (viande, animaux, et lait), la production de coproduits (résidus de culture, déjections déposées), et la production de déchets (déjections humaines). A chacune de ces productions correspond une quantité d'énergie brute par unité de produit (Bénagabou, 2011 , 2013). L'inventaire global des productions de l'exploitation permet de définir la quantité globale d'énergie brute produite par l'exploitation.

Les consommations d'énergie fossile directe et indirecte des exploitations (en MJ.an⁻¹) sont calculées à travers l'inventaire complet des consommations de carburant, d'intrants agricoles (engrais, effluents, produits phytosanitaires, semences), d'intrants d'élevage (concentré, fourrage, pâturage naturel, complexe minéraux et vitamines (CMV), achat d'animaux, produits vétérinaires), de bâtiments et matériel, d'alimentation humaine et de main d'œuvre extérieure. A chacun de ces intrants consommés correspond une quantité d'énergie fossile directement ou indirectement consommé par unité d'intrants. L'inventaire global des intrants consommés par l'exploitation permet de définir la quantité globale d'énergie fossile directement ou indirectement consommée par l'exploitation.

L'efficacité énergétique fossile (EEF) est calculée en suivant l'équation suivante :

$$EEF = \text{Production d'énergie brute totale (MJ)} / \text{Consommation d'énergie fossile directe et indirecte (MJ)}$$

Les corrélations entre les variables ont été testées à travers un test de corrélation de Pearson (sous XLSTAT 19.3) avec un seuil de significativité de 5%.

3. RESULTATS

3.1. Une diversité des pratiques d'IAE mise en œuvre dans les exploitations de polyculture-élevage et selon les types d'exploitations

Les exploitations de polyculture-élevage étudiées présentent une grande diversité de structure et d'équilibre entre activités agricole et d'élevage. Le chargement animal, indicateur de structure des exploitations de polyculture-élevage, illustre le potentiel de développement des pratiques d'intégration agriculture-élevage dans ces exploitations. Le chargement animal est très variable selon les types d'exploitation et l'orientation de leur production (Tableau VI). Autour de 0,5 dans les exploitations d'agriculteurs et d'agro-éleveurs équipées en traction animale et centrées sur les productions agricoles, il passe à environ 1 dans le cas d'exploitations ayant un noyau d'élevage en plus des activités agricoles. Chez les éleveurs, les surfaces agricoles ne suivent pas l'augmentation du cheptel et le chargement animal y est alors supérieur à 7. Les exploitations de polyculture-élevage étudiées présentent une diversité

de pratiques d'intégration agriculture-élevage. La mise en œuvre de chaque pilier (traction animale, stock fourrager, production de la fumure organique) est spécifique à chacune des exploitations.

Tableau VI. Description des pratiques d'intégration agriculture-élevage dans les différents types d'exploitations de polyculture-élevage étudiées

	Agriculteurs	Agro-éleveurs	Eleveurs	Général
Chargement animale, CA (UBT/ha)	0,5 ± 0,9	1,2 ± 0,6	15,9 ± 11,9	6,6 ± 10,1
Paire de bœuf de trait par hectare cultivé (nb/ha)	0,24 ± 0,08	0,21 ± 0,01	0,52 ± 0,38	0,34 ± 0,27
Production de FO (kg MS)	1 736 ± 655	9 260 ± 2 811	11 362 ± 4 772	7 227 ± 5 414
Production de FO par hectare cultivée (kg MS/ha)	538 ± 227	856 ± 360	2 801 ± 866	1 465 ± 1 204
Part du fumier (%)	96%	77%	12%	40%
Part du compost (%)	4%	13%	0%	4%
Parc du parc à bétail (%)	0%	3%	24%	15%
Part du bio-digesteur (%)	0%	0%	8%	5%
Part du parage directe (%)	0%	8%	43%	28%
Part de la FO importée (%)	66%	2%	0%	7%
Stock de fourrage (kg MS)	2 054 ± 1 199	2 819 ± 797	3 103 ± 3 218	2 638 ± 2 071
Stock de fourrage par UBT (kg MS/UBT)	535 ± 357	219 ± 63	67 ± 57	280 ± 299
Part de pailles de céréales (%)	82% ± 20%	73% ± 21%	51% ± 22%	71% ± 24%
Part de fane de légumineuse (%)	7% ± 7%	4% ± 4%	15% ± 17%	8% ± 10%
Part de culture fourragère(%)	0% ± 0%	1% ± 3%	14% ± 20%	4% ± 11%
Part de foin naturel (%)	9% ± 22%	0% ± 0%	7% ± 10%	6% ± 15%
Part de résidus de culture importé (%)	1% ± 2%	22% ± 26%	14% ± 29%	11% ± 21%
Efficience énergétique fossile (su)	6,8 ± 4,1	7,2 ± 3,4	17,9 ± 7,8	11,1 ± 7,6
Consommation en énergie fossile (x10 ³ MJ)	23,1 ± 13,0	46,5 ± 31,9	28,6 ± 15,8	31,0 ± 20,8
Production d'énergie brute (x10 ³ MJ)	166 ± 145	308 ± 229	451 ± 157	308 ± 205

Su : sans unité ; UBT : unité bovin tropical ;ha : hectare ;FO : fumure organique ; MS : matière sèche

3.1.1. La traction animale

La traction animale est aujourd'hui largement pratiquée dans les exploitations de la région avec en moyenne 0,34 paire de bœuf de trait par hectare cultivé pour une recommandation minimum de 0,2 paire par hectare (Vall *et al.*, 2003) (Tableau VI). Les agriculteurs et les agro-éleveurs adaptent le nombre de bœufs de trait à leur surface cultivée alors que les éleveurs disposent d'un potentiel supplémentaire valorisable (plus de 0,5 paire par hectare). Les exploitations de la zone disposent le plus souvent d'un équipement complet (une charrue, un sarcler, un butteur, une à deux charrettes) à l'exception de certains éleveurs à l'équipement incomplet. Non engagés dans la culture cotonnière, ils n'ont pas bénéficié des crédits à l'équipement octroyé aux coton-culteurs. Le nombre de paire de bœuf par hectare cultivé est fortement lié au chargement animal (p-value < 0,0001). Plus les producteurs disposent d'un nombre important d'animaux par hectare, plus ils peuvent détacher et mettre à disposition de l'agriculture des animaux pour les travaux de traction.

3.1.2. La production de fumure organique

Les exploitations de polyculture-élevage de la zone cotonnière sont aujourd'hui engagées dans la production de fumure organique avec une production moyenne de plus de 7 t de MS.an⁻¹ dans les exploitations étudiées. Cette moyenne cache cependant une énorme disparité de volume, de mode de production et de source d'acquisition entre types d'exploitations et exploitations (Tableau VI).

Chez les agriculteurs, la production de fumure organique est en moyenne de 1,7 t de MS.an⁻¹ sous forme de fumier (96% de la fumure produite) et un peu de compost (4%). Ces exploitations font également appel à des importations de fumure organique (66% de leur production) à travers l'achat ou des échanges de fumure organique contre la cession de résidus de culture.

Les agro-éleveurs produisent en moyenne plus de 9 t de MS.an⁻¹ de fumure organique, avec du fumier (77%) et du compost (13%). Ces exploitations, qui disposent d'un effectif important d'animaux d'élevage, diversifient la production de fumure avec également du parage direct (8%), de la poudrette de parc à bétail (3%), et des importations de fumure organique (2% de la fumure produite) à travers l'achat ou des échanges de fumure organique contre des travaux de transport ou la cession de résidus de culture.

Les éleveurs produisent des quantités bien plus élevées de fumure organique avec plus de 11 t de MS.an⁻¹ à travers une diversité de source, principalement d'origine animale avec le parage direct (43% de la fumure produite), la poudrette de parc à bétail (24%), du fumier (12%) et des digestats de bio-digesteur (8%). A l'inverse des autres exploitations, une part de la fumure organique produite est exportée sous forme de vente ou de troc contre des résidus de culture ou du transport (13%).

La couverture des besoins des sols est directement liée au chargement animal ($p\text{-value} < 0,0001$). Un important cheptel par hectare permet de disposer de grande quantité de déjections animales à valoriser.

Indépendamment de la structure des exploitations, une diversification et complexification des modes de production de fumure organique existe dans les exploitations de polyculture-élevage. Traditionnellement, le parage direct des animaux sur les parcelles permettait de fumer les terres agricoles, sans charge en transport. La production de fumier à la concession a commencé et s'est intensifiée avec la stabulation nocturne des animaux à la concession puis avec leur affouragement, impliquant du transport de résidus et de fumier. Enfin, plus récemment, les producteurs ont délocalisé la production de fumure organique directement au champ, limitant les charges en transport et mobilisant de biomasses mal valorisées (tige de

coton). Une marchandisation de la fumure organique apparaît également ces dernières années (importation).

Dans les exploitations enquêtées, comme cela est rapporté pour les exploitations de la région, la production de fumure organique ne suffit pas toujours à couvrir les besoins des sols avec seulement 1 465 kg de MS.ha⁻¹ en moyenne contre 2 500 kg de MS.ha⁻¹ recommandée (Berger *et al.*, 1987). Cette moyenne masque une diversité de situation entre type d'exploitation avec environ 500 kg de MS.ha⁻¹ chez les agriculteurs, 850 kg de MS.ha⁻¹ chez les agro-éleveurs et plus de 2 800 kg de MS.ha⁻¹ chez les éleveurs.

3.1.3. Le stock fourrager

Le stock fourrager est destiné à l'alimentation des animaux en saison sèche. C'est une pratique récente dans les exploitations de la zone. La mobilité du troupeau en saison sèche froide (après la récolte des champs) et en saison pluvieuse (sur les zones résiduelles non cultivées) permet d'alimenter les animaux sans puiser sur le stock fourrager. La moyenne de 2,6 t MS.an⁻¹ de fourrage stocké par les exploitations étudiées masque une grande disparité entre exploitations avec un stockage compris entre 0 et plus de 8 t MS.an⁻¹.

La couverture des besoins fourragers des animaux reste largement en deçà des normes, avec 12 % en moyenne des besoins annuels couverts par le stockage pratiqué par les exploitations, soit 280 kg MS.UBT⁻¹ an⁻¹, avec une grande disparité entre les exploitations (0 à 45 % des besoins couverts).

Le stock fourrager se compose le plus souvent des pailles de céréales stockées (pailles de maïs, un peu de sorgho, 71 % du stock), de résidus de culture importés (paille de riz achetée, 11 %), de fane de légumineuses stockées (fane d'arachide, niébé, 8%), mais aussi dans certaines exploitations de cultures fourragères (mucuna majoritairement, agro-éleveurs et éleveurs, 4%), et des stocks de foin de brousse (agriculteurs et éleveurs, 6%). De même, il apparaît des échanges marchands de fourrages entre exploitations (paille de riz, fane de légumineuse).

Le chargement animal est inversement lié au stock fourrager par UBT (p-value 0,045). Les besoins fourragers des animaux sont plus faciles à couvrir pour les exploitations au chargement animal faible. Alors que le stockage de pailles ne suffit plus pour un chargement animal élevé. D'autres sources d'acquisition de stock fourrager sont alors recherchées, indépendamment de la structure des exploitations (foin, fane, culture fourragère). En moyenne, 11% du stock fourrager est importé par l'ensemble des exploitations. Cette proportion est plus importante chez les agro-éleveurs (22%) et éleveurs (14%).

3.2. Les profils énergétiques de la diversité d'exploitations de polyculture-élevage

Les éleveurs présentent une efficacité énergétique fossile plus élevée ($17,9 \pm 7,8$), que les agro-éleveurs ($7,2 \pm 3,4$) et les agriculteurs ($6,8 \pm 4,1$). Ces différences de performance énergétique fossile s'expliqueraient par les différences de consommations d'énergie fossile et de production d'énergie brute (Tableau VI et Figure 16).

Les consommations totales d'énergie fossile des exploitations d'éleveurs et d'agriculteurs sont 1,6 fois plus faibles que celles des agro-éleveurs (respectivement 28,6 et contre 23,1 MJ.an⁻¹ contre 46,5 MJ.an⁻¹). Les consommations globales se répartissent entre le système agricole (33% des consommations totales) et le système d'élevage (44%). Cependant, chez les agriculteurs et les agro-éleveurs plus de 70 % des consommations globales sont destinées aux systèmes agricoles (engrais, produits phytosanitaires et un peu d'importation d'effluents ; (Figure 16). De même, les éleveurs investissent 3 à 5 fois plus d'énergie fossile pour les activités d'élevage par UBT que les agriculteurs et les agro-éleveurs, principalement à travers la consommation de fourrage sur des parcelles extérieures et de quelques produits vétérinaires. Leur consommation d'énergie fossile par hectare cultivé destinée au système agricole est équivalente à celle des agriculteurs et des agro-éleveurs (engrais, produits phytosanitaires). Ils présentent le même niveau d'intensification par les intrants de leur système agricole que les agriculteurs et agro-éleveurs.

Les productions totales d'énergie brute sont 1,5 à 3 fois supérieures dans les exploitations d'éleveurs que celles des agro-éleveurs et les agriculteurs (respectivement 451 184 MJ.an⁻¹, contre 308 337 et 165 467 MJ.an⁻¹). La production totale d'énergie brute chez les éleveurs est largement composée de production de coproduits (résidus de cultures, déjections animales ; 83% des productions totales). Seules les exploitations d'agriculteurs ont une production d'énergie brute totale composée uniquement des productions du système agricole (40%) et des coproduits (53 %). Les productions d'énergie brute issue du système agricole (céréales, coton, légumineuses) sont comparables dans les différents types d'exploitations (éleveurs 62 702 MJ.an⁻¹, agro-éleveurs 86 319 MJ.an⁻¹, agriculteurs 73 268 MJ.an⁻¹), alors que celles du système d'élevage (œufs, lait, viande, vente d'animaux) sont 1,5 à 12 fois supérieures chez les éleveurs (éleveurs 12 078 MJ.an⁻¹, agro-éleveurs 8 563 MJ.an⁻¹, agriculteurs 980 MJ.an⁻¹). Les agro-éleveurs obtiennent une production d'énergie brute issue du système d'élevage par UBT la plus élevée de 617 MJ.UBT⁻¹ contre 224 pour les agriculteurs et 259 pour les éleveurs. A l'inverse, ils obtiennent une production d'énergie brute issue du système agricole rapportée à la surface cultivée la plus faible de 6 691 MJ.ha⁻¹, contre 13 629 pour les agriculteurs et 13 390 pour les éleveurs.

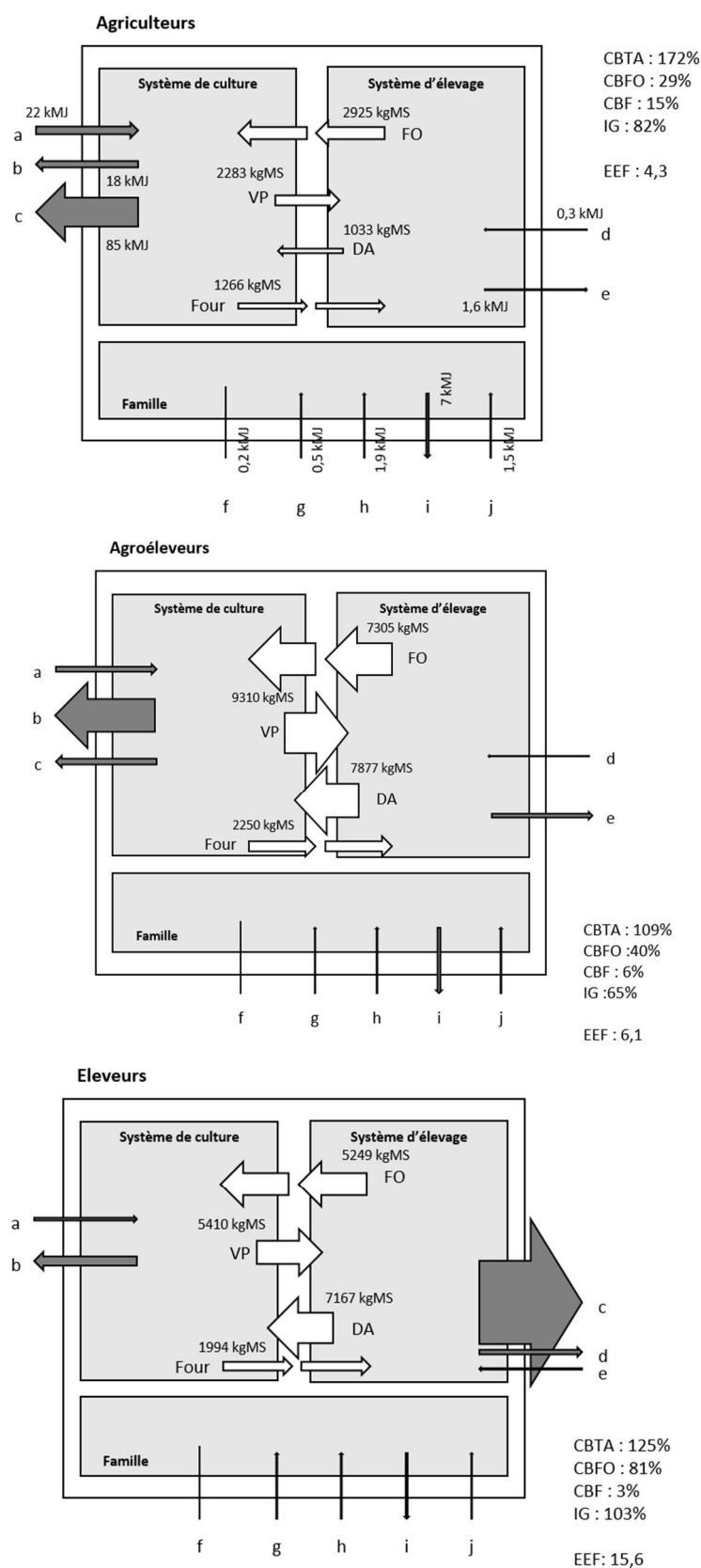


Figure 16. Profil énergétique et échange de flux de biomasses par l'intégration agriculture-élevage dans une exploitation (1) d'agriculteur, (2) d'agro-éleveurs et (3) d'éleveurs à l'Ouest du Burkina Faso

(a) Intrant agricole, (b) produit agricole, (c) co-produit, (d) produit d'élevage, (e) intrant d'élevage, (f) main d'œuvre extérieure, (g) alimentation humaine, (h) bâtiment et matériel, (i) production de déchet, (j) carburant. FO : fumure organique, VP : vaine pâture, DA : déjection animales, Four : fourrage.

3.3. Effet du chargement animal et des choix d'assolement sur l'efficacité énergétique fossile des exploitations de polyculture-élevage

L'augmentation du chargement animal améliore l'efficacité énergétique fossile (p-value 0,000). Les exploitations avec un chargement animal élevé consomment inévitablement plus d'énergie fossile par UBT pour alimenter les animaux et ce, à partir de fourrage extérieur (p-value < 0,0001) ; les coproduits issus de leurs systèmes agricoles ne permettant pas de couvrir totalement les besoins fourragers annuels des animaux.

Cependant, l'augmentation du chargement animal est également liée à une amélioration des productions totales d'énergie brute par hectare (p-value < 0,0001) et des productions de coproduits par hectare (p-value < 0,0001). En effet, la consommation fourragère à l'extérieur réalisée par les grands troupeaux s'accompagne d'un dépôt important de déjections animales sur les parcelles extérieures et les pâturages.

La place du maïs dans l'assolement n'a pas d'effet sur les consommations d'énergie fossile du système agricole par hectare. La culture de maïs n'implique pas un investissement particulier en énergie fossile, et une augmentation des consommations d'intrants agricoles. Elle s'accompagne par contre d'une amélioration de la production d'énergie brute par hectare (p-value 0,001) à travers la production de coproduit, les pailles de maïs étant en partie exportées par la vaine pâture. Ainsi, la part de maïs dans l'assolement améliore l'efficacité énergétique fossile (p-value 0,007).

La consommation totale d'énergie fossile par hectare des exploitations n'est pas liée à la part de l'assolement en coton. Toutefois, le coton implique une augmentation de la consommation d'énergie fossile par le système agricole par hectare (p-value 0,005). Cette culture exige un investissement important en intrants agricoles, soutenu par un mécanisme d'intrants fourni à crédit par les sociétés cotonnières pour assurer leur accès aux paysans (150 kg d'engrais NPK, 50 kg d'urée, 2 à 3 litres d'herbicide, 1 à 5 litres d'insecticides par hectare). Mais la part du coton dans l'assolement n'est pas liée à une amélioration des productions d'énergie brute par le système agricole. La culture du coton a un faible niveau de production en énergie brute (coton-graine et tige) et une partie seulement de cette production est vendue (coton-graine), les tiges restant sur l'exploitation. La part du coton dans l'assolement n'est donc pas liée à une dégradation de l'efficacité énergétique fossile des exploitations.

Tableau VII. Corrélation entre les variables selon un test de corrélation de Pearson

Variables	CA	% Coton	% Maïs	CBTA	CBFO	CBF	IG	Prod EB totale /ha	Prod EB totale /UBT	Prod co- produit t /ha	Prod co- produit t /UBT	Prod EB SA /ha	Prod EB SE /UBT	Conso EF total /ha	Conso EF totale /UBT	Conso EF SE /UBT	Conso EF SA /ha	EEF
CA	1	-0,480	0,763	0,947	0,895	-0,507	0,984	0,980	-0,365	0,985	-0,262	-0,057	-0,207	0,832	-0,503	0,915	-0,372	0,776
% Coton	-0,480	1	-0,286	-0,324	-0,570	0,648	-0,429	-0,329	0,780	-0,362	0,655	0,421	-0,042	-0,145	0,836	-0,546	0,666	-0,309
% Maïs	0,763	-0,286	1	0,661	0,766	-0,324	0,762	0,754	-0,192	0,721	-0,151	0,364	-0,427	0,777	-0,296	0,803	0,021	0,641
CBTA	0,947	-0,324	0,661	1	0,749	-0,372	0,959	0,956	-0,242	0,962	-0,181	-0,081	-0,198	0,889	-0,326	0,864	-0,253	0,633
CBFO	0,895	-0,570	0,766	0,749	1	-0,546	0,900	0,856	-0,402	0,849	-0,291	0,079	-0,101	0,648	-0,588	0,860	-0,367	0,863
CBF	-0,507	0,648	-0,324	-0,372	-0,546	1	-0,423	-0,364	0,846	-0,404	0,690	0,509	-0,256	-0,183	0,820	-0,508	0,642	-0,342
IG	0,984	-0,429	0,762	0,959	0,900	-0,423	1	0,981	-0,285	0,978	-0,205	0,029	-0,195	0,857	-0,426	0,914	-0,286	0,778
Prod EB totale /ha	0,980	-0,329	0,754	0,956	0,856	-0,364	0,981	1	-0,177	0,996	-0,081	0,056	-0,231	0,863	-0,366	0,884	-0,271	0,800
Prod EB totale /UBT	-0,365	0,780	-0,192	-0,242	-0,402	0,846	-0,285	-0,177	1	-0,219	0,953	0,567	-0,112	-0,086	0,744	-0,376	0,572	-0,079
Prod co-produit /ha	0,985	-0,362	0,721	0,962	0,849	-0,404	0,978	0,996	-0,219	1	-0,112	-0,027	-0,213	0,843	-0,404	0,880	-0,328	0,791
Prod co-produit /UBT	-0,262	0,655	-0,151	-0,181	-0,291	0,690	-0,205	-0,081	0,953	-0,112	1	0,451	-0,040	-0,091	0,543	-0,268	0,359	0,069
Prod EB SA /ha	-0,057	0,421	0,364	-0,081	0,079	0,509	0,029	0,056	0,567	-0,027	0,451	1	-0,269	0,195	0,471	0,018	0,653	0,179
Prod EB SE /UBT	-0,207	-0,042	-0,427	-0,198	-0,101	-0,256	-0,195	-0,231	-0,112	-0,213	-0,040	-0,269	1	-0,252	-0,193	-0,247	-0,128	-0,228
Conso EF total /ha	0,832	-0,145	0,777	0,889	0,648	-0,183	0,857	0,863	-0,086	0,843	-0,091	0,195	-0,252	1	-0,060	0,793	0,141	0,450
Conso EF totale /UBT	-0,503	0,836	-0,296	-0,326	-0,588	0,820	-0,426	-0,366	0,744	-0,404	0,543	0,471	-0,193	-0,060	1	-0,561	0,869	-0,450
Conso EF SE /UBT	0,915	-0,546	0,803	0,864	0,860	-0,508	0,914	0,884	-0,376	0,880	-0,268	0,018	-0,247	0,793	-0,561	1	-0,362	0,682
Conso EF SA /ha	-0,372	0,666	0,021	-0,253	-0,367	0,642	-0,286	-0,271	0,572	-0,328	0,359	0,653	-0,128	0,141	0,869	-0,362	1	-0,409
EEF	0,776	-0,309	0,641	0,633	0,863	-0,342	0,778	0,800	-0,079	0,791	0,069	0,179	-0,228	0,450	-0,450	0,682	-0,409	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

CA : chargement animal, CBTA : couverture des besoins en traction animale, CBFO : couverture des besoins en fumure organique, CBF : couverture des besoins en fourrage, IG : indice global d'intégration agriculture-élevage, EB : énergie brute, SA : système agricole, SE : système d'élevage, EF : énergie fossile, EEF : efficacité énergétique fossile

La structure de l'exploitation et son orientation vers des productions agricoles ou d'élevage, vers du coton ou du maïs influence l'efficacité énergétique fossile, la consommation d'énergie fossile directe et indirecte et la production d'énergie brute via la consommation d'intrants du système agricole et de ressources fourragères à l'extérieur par les animaux et la production de produits et coproduits du système agricole (grains, paille) et du système d'élevage (déjections animales). La structure des exploitations et leur choix stratégique d'assolement conditionnent la gamme possible d'efficacité énergétique fossile des exploitations de polyculture-élevage. Dans ce contexte, les pratiques d'intégration agriculture-élevage peuvent-elles avoir un effet sur l'efficacité énergétique fossile en réduisant les consommations d'énergie fossile et en améliorant les productions d'énergie brute ?

3.4. Effet des pratiques d'IAE sur l'efficacité énergétique fossile des exploitations de polyculture-élevage

2.4.1. L'effet de la traction animale

La couverture des besoins en traction animale s'accompagne d'une bonne efficacité énergétique fossile (p-value 0,008). Le recours à la traction animale ne permet cependant pas une moindre consommation d'énergie fossile sur le système agricole par un allègement de l'intensification par les intrants. Dans les exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso, la traction animale ne permet pas de limiter le recours aux herbicides, mais accompagne leur usage. De même, il n'y a pas de lien entre la couverture des besoins en traction animale et la production d'énergie brute par hectare issue du système agricole. La traction animale permet une installation rapide et un meilleur entretien des cultures et le transport des récoltes. Utilisée dans toutes les exploitations non motorisées, elle ne permet pas d'améliorer les rendements agricoles observés. En revanche, la couverture des besoins de traction animale est liée à une importante consommation d'énergie fossile par UBT pour le système d'élevage (p-value < 0,0001). Les animaux de trait, par leur statut privilégié, bénéficient d'un meilleur entretien par le propriétaire (investissement en aliments concentrés et fourrage importé) et impliquent une importation de ressources fourragères à travers la vaine pâture. Ces importations s'accompagnant d'une production de coproduits par hectare élevé (dépôt de fèces, p-value < 0,0001).

2.4.2. L'effet de la production de fumure organique

La production de FO améliore l'efficacité énergétique fossile des exploitations (p-value < 0,0001). Il n'y a pas de liens entre la couverture des besoins en fumure organique et la consommation en énergie fossile par hectare par le système agricole. De fortes doses de fumure organique ne s'accompagnent pas d'une réduction des apports d'engrais à l'échelle

des exploitations de polyculture-élevage étudiées. La fumure organique soutient la production agricole et l'effet des engrais investis. Elle participe à l'intensification agricole. La couverture des besoins en fumure organique des sols s'accompagne d'une production élevée d'énergie brute par hectare cultivé ($p\text{-value} < 0,0001$), sans lien avec les productions issues du système agricole ou d'élevage mais plutôt avec celle des coproduits ($p\text{-value} < 0,0001$) à travers le dépôt de déjections animales au cours du pâturage.

2.4.3. L'effet de la production et / ou stockage de fourrage

La couverture des besoins en fourrage n'améliore pas l'efficacité énergétique fossile des exploitations étudiées. Par contre le stock fourrager permet de réduire les consommations d'énergie fossile du système d'élevage par UBT ($p\text{-value} 0,021$). Le stock fourrager permet aux exploitations de polyculture-élevage d'améliorer leur autonomie vis-à-vis du milieu extérieur pour l'alimentation des animaux (ressource fourragère pas toujours disponible, accessible ou de qualité). Cependant, une meilleure couverture des besoins fourragers ne s'accompagne pas d'une amélioration des productions du système d'élevage par UBT. Les stocks réalisés ne permettent de couvrir en moyenne que 10% des besoins du troupeau (0 à 41%). De plus, les fourrages stockés sont destinés à des lots spécifiques d'animaux (laitier, gestante, malade) et ne permettent donc pas d'améliorer les performances animales à l'échelle du troupeau.

2.4.4. L'effet global de l'intégration agriculture-élevage

L'effet synergique des trois piliers de l'intégration agriculture-élevage améliore l'efficacité énergétique fossile des exploitations de polyculture-élevage ($p\text{-value} < 0,0001$). Contrairement à l'hypothèse initiale, l'intégration agriculture-élevage, avec l'indicateur global (IG) s'accompagne d'une augmentation des consommations d'énergie fossile par hectare avec une augmentation particulière des consommations par le système d'élevage par UBT (consommation des pâturages par les animaux ; $p\text{-value} < 0,0001$). La production d'énergie brute par hectare cultivé est améliorée via la production de co-produits ($p\text{-value} < 0,0001$).

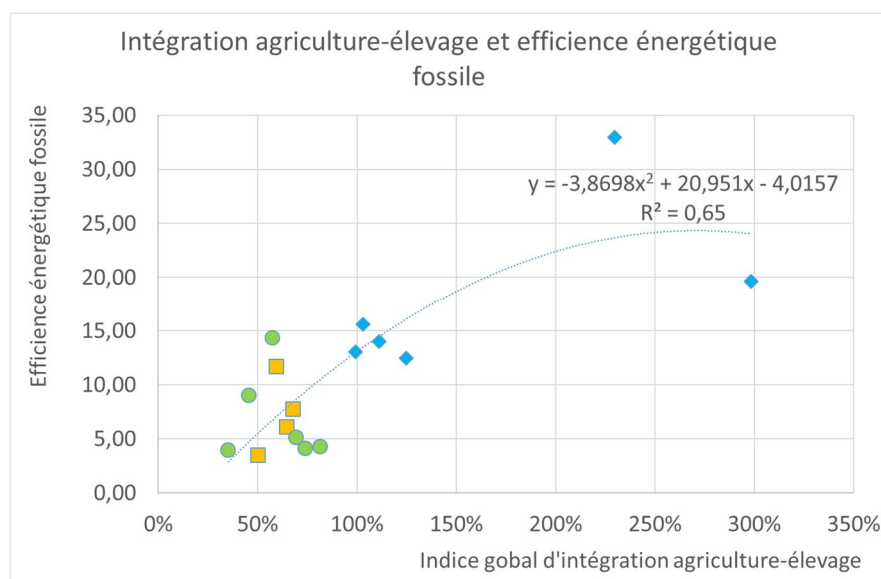


Figure 17. Indice global d'intégration agriculture-élevage (IG) et Efficacité énergétique fossile (EEF) dans les exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso

4. DISCUSSION

4.1. Retour sur la méthode et les indicateurs retenus

L'indicateur d'intégration global (IG) et les indicateurs de couverture des besoins en traction animale (CBTA), en fumure organique (CBFO) et en fourrage (CBF) proposés semblent suffisamment synthétiques et robustes pour illustrer l'intensité des pratiques d'intégration agriculture-élevage dans les exploitations de polyculture-élevage étudiées. Le calcul de ces indicateurs nécessite peu de données d'entrées. Ils pourraient donc être utilisés dans des études impliquant des échantillons d'exploitation de polyculture-élevage plus conséquents afin d'évaluer le niveau d'intégration biotechnique des systèmes de production agricole et d'élevage.

Cet indicateur global masque cependant la diversité des pratiques d'intégration mises en œuvre dans les exploitations. Avec cet indicateur global, l'effet d'une pratique d'intégration agriculture-élevage peut annuler l'effet d'une autre pratique, sans que les pratiques soient pourtant interchangeables. C'est le cas de certains éleveurs qui présentent des indices globaux élevés grâce à une très bonne couverture des besoins en fumure organique, sans pour autant mettre en œuvre des efforts pour le stockage de fourrage. Il paraît donc nécessaire de s'intéresser globalement à l'intégration agriculture-élevage mais aussi spécifiquement aux trois piliers biotechniques.

De même, caractériser le niveau d'intégration agriculture-élevage par les résultats atteints en termes de couverture des besoins en traction, en fumure organique ou en fourrage, ne permet pas de distinguer les différentes modalités des pratiques mises en place par les producteurs

pour atteindre ces résultats. Ces indicateurs s'appuient sur les résultats, sans prendre en compte les voies et moyens mis en œuvre pour les atteindre. La fumure organique épandue vient-elle de la collecte des refus fourragers et déjections animales, qui une fois transformés, ont été transportés et épandus sur les champs ou du parcage direct des animaux de l'exploitation, n'impliquant ni valorisation des résidus de culture, ni travail, ni transport ? Le stock fourrager a-t-il été construit à partir de la valorisation de résidus de culture autrement perdus, ou d'une production spécifique de fourrage ? Bénagabou *et al.* (2017) distingue les pratiques d'intégration agriculture-élevage passives et actives selon les pratiques mises en œuvre et les investissements en travail, en transport et en intrants réalisés.

S'intéresser à la consommation d'énergie fossile dans les exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso pour identifier les pratiques d'intégration agriculture-élevage permettant une plus grande durabilité paraît insuffisante. En effet, les pratiques d'intégration agriculture-élevage permettant une meilleure efficacité énergétique fossile s'appuient sur une forte consommation d'énergie brute du milieu environnant. Ces ressources naturelles, même si elles sont renouvelables, n'en restent pas moins fragiles. La durabilité des pratiques s'appuyant sur une forte consommation de ces ressources pourrait être remise en cause par leur dégradation.

L'indicateur d'efficacité énergétique fossile ne suffit donc pas à indiquer la contribution des pratiques d'intégration agriculture-élevage à la durabilité des systèmes de production. Il paraît nécessaire de s'intéresser également à l'usage de l'énergie brute produite dans les exploitations et leur environnement.

Les limites des indicateurs retenus dans cette étude invitent à mobiliser, dans les études à venir, une approche permettant de prendre en compte la diversité des modalités des pratiques d'intégration agriculture-élevage au-delà de la couverture de besoins en traction, en fumure organique ou en fourrage pour approfondir l'étude de l'effet de ces pratiques sur l'efficacité énergétique des exploitations.

Bénagabou *et al.* (2017) proposent de mobiliser la méthode d'analyse de réseau écologique (ecological network analysis [ENA]) appliquée à l'étude des flux d'énergie brute pour analyser l'effet des pratiques d'intégration agriculture-élevage sur l'autonomie, le recyclage et l'efficacité énergétique des exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso. De plus, il apparaît que pour analyser l'effet des pratiques d'intégration agriculture-élevage, il serait pertinent d'intégrer une analyse multi-énergie (Vigne, 2012) afin de prendre en compte l'énergie fossile des intrants, l'énergie brute échangée entre le système d'élevage, le système agricole et l'environnement des exploitations, mais aussi, l'énergie liée au travail pour détailler l'effet de la traction animale, et l'énergie solaire permettant la photosynthèse.

4.2. Apport des pratiques d'intégration agriculture-élevage sur la durabilité des exploitations de polyculture-élevage

D'après les résultats sur les profils énergétiques des exploitations de polyculture-élevage étudiées, les meilleures efficacités énergétiques fossiles ne sont pas uniquement dues à une faible consommation d'énergie fossile, mais s'accompagnent d'une forte consommation d'énergie brute. Les postes de consommation d'énergie fossile sont l'alimentation et les intrants agricoles. La recherche d'une meilleure durabilité de ces systèmes de production ne devrait pas passer par la recherche de réduction des intrants agricoles et d'élevage mais plutôt la construction d'une meilleure autonomie fourragère. En effet, les systèmes de production étudiés restent des systèmes à faible utilisation d'intrant, avec en moyenne 35,1 kg d'N par hectare cultivé dans les exploitations étudiées d'après cette étude, alors qu'elle était de 141 kg pour les terres cultivées en France entre 2008 et 2010 (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2011) ou plus de 350 kg d'engrais par hectare en Asie du Sud-Est (Banque mondiale, 2014). Les consommations d'intrants agricoles ne sont pas liées à un effondrement de l'efficacité énergétique des exploitations étudiées comme observé dans les systèmes intensifs (cas des exploitations périurbaines au Burkina Faso) (Bénagabou *et al.*, 2013).

Dans les exploitations de polyculture-élevage étudiées, le poste important de consommation indirecte d'énergie fossile reste l'alimentation animale à partir des ressources fourragères extérieures, comme c'est le cas dans les exploitations laitières intensives de la Réunion (Vayssière et Rufino., 2012) et des zones périurbaines au Burkina Faso (Bénagabou *et al.*, 2013). La mobilité animale permettant la recherche de ressource fourragère pour la couverture des besoins quotidiens des animaux semble être un facteur clé de la bonne efficacité énergétique fossile des exploitations de polyculture-élevage étudiées. La mobilité animale permet un prélèvement de ressources fourragères par les animaux là où les ressources sont disponibles (parcours naturels, forêts, champs d'autres agriculteurs). Ces prélèvements dans le milieu extérieur s'opèrent à coût énergétique fossile indirecte réduit et s'accompagnent du dépôt de déjections animales, forme de production d'énergie brute, favorisant l'efficacité énergétique du système. Ce recours fort aux ressources fourragères extérieures interroge cependant la durabilité de ces systèmes de production avec l'augmentation en cours de la pression sur les ressources pastorales. La mobilité animale pourrait être remise en cause avec l'augmentation continue de l'emprise agricole. Le développement des surfaces cultivées pourrait entraver le passage des animaux vers les parcours en saison des cultures (Vall et Diallo, 2009). Dans ce contexte, la durabilité des systèmes de production s'appuyant sur un prélèvement de ressources extérieures ne serait plus assurée. De même, l'intensification de

l'IAE active par l'intermédiaire d'une augmentation du taux de collecte des résidus de culture après les récoltes par des individus pour le stock fourrager ou la production de fumure organique pourrait remettre en cause le recours à la vaine pâture, hypothéquant la durabilité des systèmes.

De plus, les résultats montrent des transferts de fumure organique depuis les exploitations d'éleveurs vers les exploitations d'agriculteurs et d'agro-éleveurs, suivant des échanges monétaires ou du troc de résidus de culture ou de transport contre les déjections animales, confirmant les observations faites (Tinguéri, 2015 ; Blanchard *et al.*, 2017). Ces échanges inter-exploitation s'accompagnent d'un déséquilibre chez les agriculteurs et agro-éleveurs disposant de peu d'animaux (chargement animal réduit) au profit des éleveurs et des agro-éleveurs bien équipés (Andrieu *et al.*, 2015 ; Diarisso *et al.*, 2015). Ces transferts de fertilité entre exploitations risquent de renforcer les inégalités entre exploitation, au profit des plus nantis, remettant en cause la durabilité sociale des systèmes de production.

4.3. Quelles voies d'améliorations de la durabilité des exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso ?

Les pratiques d'intégration agriculture-élevage, qu'elles soient actives ou passives (Bénagabou *et al.*, 2017) participent à la durabilité des systèmes de production.

L'intégration agriculture-élevage passive s'appuie sur une mobilisation importante des ressources extérieures, à travers le prélèvement de ressources fourragères par les animaux au pâturage. La durabilité de cette pratique pourrait être remise en cause par l'amenuisement des espaces pastoraux. La collecte et/ou la production de fourrage de qualité sur les exploitations de polyculture-élevage de l'ouest du Burkina Faso semble être l'un des points d'entrée de l'amélioration de la durabilité de ces systèmes de production. Une amélioration de l'autonomie fourragère soutiendrait l'efficacité énergétique fossile, les productions agricoles et d'élevage sans augmenter le recours aux importations coûteuses (énergie, monétaire). Pour assurer l'autonomie fourragère des exploitations d'éleveurs disposant d'un grand troupeau, la surface nécessaire à la production de fourrage ne serait pas en accord avec les surfaces disponibles par ce type d'exploitation (Vigne, 2012). La réduction de la taille du troupeau ne serait pas non plus en adéquation avec la perception actuelle des éleveurs. Dans ce type d'exploitation, la recherche de l'autonomie fourragère est un processus complexe, qui nécessite des changements profonds, que quelques éleveurs ont cependant entamé avec la production de fourrage de qualité (mucuna, niébé multi-usage, leucena, etc.) destiné à un lot restreint d'animaux laitiers (Delma, 2016 ; Coulibaly, 2012).

L'intégration agriculture-élevage active s'appuie sur une valorisation des ressources internes de l'exploitation, avec la production et le stockage de fourrage et la collecte et la transformation de refus de fourrage et de déjections animales en fumure organique. Ces pratiques apportent de la durabilité aux systèmes de production, en soutenant l'efficacité énergétique fossile et les productions agricole et d'élevage, sans augmenter le recours aux intrants, voir en permettant de les limiter. Sa mise en œuvre reste cependant conditionnée par l'existence d'un potentiel (disponibilité de ressources) au sein des exploitations. Il existe des marges de manœuvre sous exploitées dans les exploitations de polyculture-élevage étudiées, avec une sous-valorisation des résidus de cultures et des déjections animales produites sur les exploitations et une amélioration potentielle des productions.

L'amélioration de la collecte et ou de la production de ressources fourragères dans les exploitations de polyculture-élevage de la région pourrait passer par un changement de qualité des ressources produites vers des fourrages plus productifs et avec davantage de légumineuses intégrés dans les interstices des assolements et des rotations (cultures associées, en dérobé, intercalaires, dans les jardins, en bandes ou dans les allées). De plus, la maîtrise des conditions de récolte et de stockage de ces ressources permettrait d'améliorer l'autonomie fourragère des troupeaux. Cinq à dix pourcent (5 à 10 %) des feuilles de graminées seraient perdues lors de la manipulation des fourrages et jusqu'à 25% pour les légumineuses (Klein *et al.*, 2014). Au stockage, il y aurait un risque de perte de valeur énergétique, de digestibilité et de matière azotée. La qualité des fourrages serait mieux conservée par l'utilisation systématique de botteuse, le stockage sous fenil, voir la pratique de l'ensilage ou de la paille à l'urée (Klein *et al.*, 2014).

Pour augmenter la production de fumure organique, les exploitations de polyculture-élevage peuvent améliorer le temps de stabulation des animaux à travers l'amélioration de la couverture de leurs besoins fourragers par les techniques décrites ci-dessus, et une amélioration du taux de collecte des refus de fourrage et des déjections animales.

La valorisation des ressources autrement non valorisées permettrait également d'augmenter les volumes de fumure organique produite sans compétition avec les autres activités (tige de cotonnier, spathes de maïs, glumes de céréales, sous-produits agro-industriels non fourragers, etc.). La mobilisation de nouvelles biomasses pour la production de fumure organique nécessite de développer des techniques de production adéquates et adaptées aux conditions matériels des exploitations. Le compostage des tiges de cotonnier au champ, sans transport, sans arrosage et avec un investissement minimum en temps de travail correspond à ce besoin (Blanchard *et al.*, 2014). La production et le transport de fumure organique pourraient également être améliorés par : (i) la délocalisation de la production sur les lieux de disponibilité des biomasses (au champ, à proximité des moulins, des lieux d'abreuvement) ;

(ii) un renforcement des échanges de biomasses entre exploitations à travers des contrats de fumure (Dongmo., 2009), mais aussi des échanges de déjections animales, de tige de coton (Diarrisso *et al.*, 2015), de graine de coton ou autres ressources (Tingueri, 2015) ; (iii) l'amélioration des capacités de transport des exploitations (triporteurs, ridelles sur les charrettes) ; (iv) la maîtrise des conditions de transformation de la fumure organique (couverture des installations, humidité), afin de favoriser la production de qualité sans augmenter les pertes en nutriments (Rufino *et al* 2009 ; Blanchard *et al.* 2014).

5. CONCLUSION

Les pratiques d'intégration agriculture-élevage étudiées améliorent l'efficacité énergétique fossile des exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso. Cependant, l'intégration agriculture-élevage ne s'accompagne pas d'une réduction du recours aux engrais, ou aliments dans ces systèmes de production à bas niveaux d'intrants. Ces pratiques n'apportent pas non plus une amélioration des rendements ou de la productivité des systèmes d'élevage à l'échelle des exploitations de polyculture-élevage. Les systèmes de production agricoles et d'élevage, pris dans leur ensemble restent peu productifs. Les pratiques d'intégration agriculture-élevage ne se substituent pas à une intensification classique des systèmes de production, mais accompagnent cette intensification. La fumure organique produite est utilisée en complément des engrais épandus et soutient la production agricole. La production de fourrage correspond aux prémices d'une intensification de noyau d'élevage. Ces pratiques d'intégration agriculture-élevage ont un effet sur les performances énergétiques des exploitations à travers la production et les échanges entre exploitations de co-produits des systèmes agricole et d'élevage (résidus de culture, déjections animales). Le renforcement des pratiques d'intégration agriculture-élevage contribuerait à la durabilité des exploitations de polyculture-élevage, à travers le renforcement de l'autonomie fourragère et l'amélioration de la production de fumure organique. Cette étude montre la pertinence de s'intéresser aux co-produits de l'agriculture et l'élevage, au-delà des productions nobles. Il paraît nécessaire d'analyser le recyclage de l'énergie brute au sein des exploitations pratiquant l'intégration agriculture-élevage et les différentes formes d'énergies mobilisées et produites pour comprendre l'effet de ces pratiques sur l'efficacité des exploitations de polyculture-élevage.

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

Does crop-livestock integration improve energy use efficiency, recycling and self-sufficiency of mixed smallholder farming systems in Burkina Faso?

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

Ouèbonnga 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/revet.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. 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. Méd. Vet. Pays Trop.*, 70 (2): 31-41, doi: 10.19182/revet.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, 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 : idadee@yahoo.fr

 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

³L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE AMELIORE-T-ELLE L'EFFICIENCE, LE RECYCLAGE ET L'AUTONOMIE ENERGETIQUE BRUTE DES EXPLOITATIONS FAMILIALES MIXTES AU BURKINA FASO ?

Does crop-livestock integration improve energy use efficiency, recycling and self-sufficiency of mixed smallholder farming systems in Burkina Faso?

Bénagabou O.I., Blanchard M., Bougouma Yameogo V., Vayssières J., Vigne M., Vall E., Lecomte P., Nacro H.B., 2017. L'intégration agriculture-élevage améliore-t-elle l'efficacité, le recyclage et l'autonomie énergétique brute des exploitations familiales mixtes au Burkina Faso ? *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux* **70** (2) : 31-41

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. 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 est 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 8 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 *Ecological Network Analysis* (ENA). Les résultats montrent que le stockage de fourrage et la production de fumure organique permettent 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 différentes structures (agriculteur, agro-éleveur, éleveur) et évalue l'apport des pratiques 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 permettant d'améliorer le recyclage de l'énergie dans les exploitations familiales mixtes de la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso.

³ Article publié dans *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 2017, **70** (2): 31-41

Ouèbounga Ida BÉNAGABOU ^{1 2 3*}, Mélanie BLANCHARD ^{1 2}, Valérie BOUGOUMA ³, Jonathan VAYSSIERES ², Mathieu VIGNE ², Eric VALL ², Philippe LECOMTE ², Hassan Bismarck NACRO ³

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

² CIRAD-UMR Selmét, TAC-112/A Campus de Baillarguet, F-34398 Montpellier, Cedex 5, France

³ UPB, IDR, 01 B.P. 1091 Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

Bénagabou, O. Ida., Tel : (+226) 70 00 15 61, E-mail : idadec@yahoo.fr

Mots clefs : intégration agriculture-élevage, analyse des réseaux écologiques, efficience, énergie brute, exploitations mixtes, Burkina Faso

Abstract

Facing the major challenge of population growth, agricultural sector must be able to reconcile, environmental impact limitation and food production increased. The practice of crop-livestock integration (CLI) applied by mixed family farms with low inputs use, may be a way to do it. One main principle of the CLI is the use produced resources of one compartment for conducting others compartments. CLI is built around three major practices: draught animal, the fodder stock and manure production. The paper purpose is to analyze the effect of these practices on mixed family farms autonomy, recycling and gross energy efficiency. To do this, gross energy flows to height mixed family farms in western Burkina Faso (Koumbia commune) followed during 20 months were analyzed by *Ecological Network Analysis* (ENA) method. The results show both CLI practices allow farms to increase recycling and autonomy and get better energy efficiency. The ENA approach highlights farms characteristics and properties of different structures (crop farmer, crop-livestock farmer and livestock farmers) and evaluates CLI practices contribution practices on these properties. However, it appears, the implementation level of CLI forms in farms doesn't reach an intermediate level, demonstrating leeway to improve energy recycling in these mixed family farms in the study area.

Keywords: crop-livestock integration, ecological network analysis, efficiency, gross energy, mixed farm, Burkina Faso

1. 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 donc 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 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 agricole sont mis en œuvre par des exploitations familiales mixtes (Herrero *et al.*, 2010), caractérisés par une utilisation limitée d'intrants agricoles et une faible productivité due 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 3 piliers biotechniques permettant le recyclage de la biomasse et de l'énergie entre le système agricole et le système d'élevage : (i) l'usage de l'énergie animale pour le système de culture via la *traction animale*, (ii) le transfert des *fourrages* (résidus de cultures, cultures fourragères) pour l'alimentation des animaux et (iii) la production de la *fumure organique* issue des déjections animales et du recyclage des résidus de culture à destination du système de culture (Landais et Lhoste, 1990 ; Lhoste, 2004a ; 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 des consommations d'énergie fossile et brute (Vigne; 2012 ; Bénagabou *et al.*; 2013) 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 d'évaluer l'effet des pratiques d'IAE sur l'efficacité, le recyclage et l'autonomie de l'énergie brute dans les exploitations familiales mixtes, en posant l'hypothèse que ces pratiques participent à une gestion durable des ressources dans les agroécosystèmes.

Pour évaluer l'autonomie, le recyclage et l'efficacité énergétique, la méthode *Ecological Network Analysis* (ENA) (Rufino *et al.*, 2009a ; Dalsgaard et Oficial, 1997 ; Alvarez *et al.*, 2014 ; 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 in Chabert 1953). Elle a été introduite en écologie par (Hannon, 1973) pour quantifier les relations dans les écosystèmes (Fath et Patten, 1999a ; Ulanowicz, 2001), et dans les agroécosystèmes pour analyser les relations entre les compartiments ou activités des exploitations agricoles (Rufino *et al.*, 2009a ; Dalsgaard et Oficial, 1997 ; 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.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. 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'', longitude 4°24'010''). 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 UBT.km⁻² (UBT : unité bovin tropical), 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.*, 2006b ; Vall et Diallo, 2009).

Une typologie des exploitations familiales mixtes de la zone comprenant 3 types a été proposée précédemment (Vall *et al.*, 2006a , 2011) : (i) les *agriculteurs* (A) 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) ; (ii) les *éleveurs* (E) 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 (iii) les *agro-éleveurs* (AE) 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 : 3 agriculteurs, 2 agro-éleveurs et 3 éleveurs. Le choix du village et des exploitations étudiées se base sur l'existence d'un panel 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.*, 2006a , 2011) 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 Chia, 2014)..

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 (Rufino *et al.*, 2009a ; Dalsgaard et Oficial, 1997 ;

Alvarez *et al.*, 2014 ; Stark, 2016). Cette approche trouve son intérêt dans la compréhension fine des pratiques individuelles (Dalsgaard et Oficial, 1997 ; Sempore *et al.*, 2015).

2.2. Méthode d'analyse de réseau écologique ou Ecological Network Analysis (ENA)

Le réseau de flux a été analysé par la méthode *Ecological Network Analysis* (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 : (i) 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 (ii) 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.

2.3. 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.*, 2006a ; Vall et Diallo, 2009). La conceptualisation du système a abouti à la définition de 30 flux d'énergie brute (8 inflows, 9 outflows, 13 internalflows ; Figure 10 à la page 46).

La conceptualisation est une étape importante lors de l'application de la méthode ENA en définissant l'exhaustivité des flux à quantifier

2.4. La collecte des données

Un livret de suivi a été élaboré pour chacune des huit exploitations et s'articulait autour de 7 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 10 à la page 46. Le

suivi a été réalisé sur 20 mois (mai 2013 à décembre 2014) car certains flux (F3, F4, F6 et F22) 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'est le cas (i) de l'achat de produits alimentaires (F9), l'achat d'intrants agricoles (F12), d'alimentation animale (F13) et d'animaux (F15) ; (ii) de la vente des produits agricoles et animaux (F10 et F14), de fumure organique (F24), de résidus de culture (F26) et du vol ou de la mort d'animaux (F29) et (iii) de l'autoconsommation des animaux et des produits animaux (F8 et F22), des semences (F30) et de la biomasse végétale pour remplir les fosses (F5).

D'autres flux ont été mesurés dans les exploitations au moment de leur mise en œuvre. C'est le cas du stockage (F1), et de la distribution des fourrages (F2), de la production de déjections animales (F3), du refus de fourrage (F4), de l'épandage de fumure organique (F6), du stockage des produits agricoles (F7), et des produits non alimentaires tel que le bois consommé par la famille (F11) et des ordures ménagères produites par la famille (F27).

Les quantités de biomasse manipulées pour ces activités ont été pesées avec des pesons adaptés (5 à 200 kg) selon une fréquence variable (soit 3 jours par mois pour F2, F3, F4 et F11 soit 1 à 5 jours par an pour F1, F6 et F7) en fonction du besoin de renseignement du flux. Ainsi, la mesure de la distribution des fourrages (F2) 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 (F3) étaient ramassées, séparées des refus d'affouragement (F4) 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 tels que la quantité de fourrage ingérée sur les parcours (F17, F18, F21 et F25) et la quantité de déjection déposée sur les parcours (F16, F19, F23 et F20) ou dans les latrines (F28), 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 animales 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 ; F3 et F4) et est utilisée pendant la campagne agricole suivante (n+1 ; F6). 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 (F22). Ces hypothèses ont été validées auprès de ces 8 exploitations étudiées en 2013 (Bénagabou *et al.*, 2013).

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

Parmi les indicateurs proposés par la méthode ENA, sept (07) 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) : (i) un indicateur de structure (la densité des liens, Li/n), (ii) les indicateurs de fonctionnement (le *Total System Throughflows*, TST ; le *Path Length*, PL ; l'*Internal Cycling Rate*, ICR et le *Finn Cycling Index*, FCI), (iii) les indicateurs de performance (la dépendance, D et l'efficacité d'énergie brute, EEB ; Tableau VIII).

2.6. 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 (CA) des exploitations exprimé en nombre d'Unité Bovin Tropical par hectare de surface cultivée ($UBT \cdot ha^{-1}$). 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 activités de cultures et d'élevage.

Trois indicateurs décrivant les pratiques d'IAE ont été calculés : (i) la quantité de résidus de culture et de fourrage (autoproduits et importés) stockés rapportée à la taille du troupeau (en $kg \text{ MS} \cdot UBT^{-1} \cdot an^{-1}$) ; (ii) la production annuelle de fumure organique rapportée à la surface cultivée (en $kgMS \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) traduisant une IAE passive ; (iii) les efforts de production de fumure organique à travers la production de fumure organique rapportée à la taille du cheptel (en $kgMS \cdot UBT^{-1} \cdot an^{-1}$) traduisant une IAE Stock .

Le niveau de performance de ces pratiques est estimé à travers la couverture des besoins alimentaires des animaux permis par le stockage de fourrage (en % de $6,5 \text{ kg MS} \cdot j^{-1} \cdot UBT^{-1}$) (Boudet, 1984) et la couverture des besoins en fumure organique des sols (en % de $2,5 \text{ t MS} \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) (Berger *et al.*, 1987). La traction animale, 3^{ème} 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 à l'aide du logiciel XL STAT version 18.07.

Tableau VIII. Indicateurs utilisés dans l'analyse de réseau des flux d'énergie brute dans les agroécosystèmes et leur calcul

Indicateurs	Définitions et mode de calcul	Interprétation
Indicateur de structure		
Densité des liens (Li/n)	Rapport entre le nombre de flux (Li) et le nombre de compartiment (n) dans le système	Evaluation de la diversité / complexité du système
Indicateurs de fonctionnement		
Total System Throughflows (TST)	Somme de tous les flux traversant les compartiments du système	Mesure l'activité totale du système Evaluation de l'intensité du recyclage du système
Path Length (PL)	Rapport entre TST et TIN	Nombre moyen de compartiments traversé par une unité d' <i>inflow</i> entre son entrée dans le système à sa sortie
Internal Cycling Rate (ICR)	Rapport entre la somme des internalflows (TT) et le TST	Part de l'activité créée par les flux internes entre les compartiments Efficience de recyclage de tous les compartiments
Finn Cycling Index (FCI)	Rapport entre TSTc et TST $0 < FCI < 1$ avec 0 pas de recyclage et 1 recyclage total	Probabilité qu'une faction de flux d'un compartiment y retourne directement ou indirectement
Indicateurs de performance		
Autonomie (A)	Rapport entre IN et TST	Evaluation du degré d'autonomie (A) du système. $A = 1 - D$
Efficience d'énergie brute (EEb)	Rapport entre les outflows et les inflows	Evaluation de la performance énergétique du système

IN = somme des inflows du système étudié

TIN = somme des importations (IN) de chaque compartiment et des variations de stock des compartiments

TT = somme des internal flows

3. RESULTATS

3.1. Diversité de pratiques d'IAE

3.1.1. Stockage de résidus de culture selon les types d'exploitation

Les quantités de fourrages stockés par les exploitations rapportées à la taille du troupeau variaient de 0 à 929 kgMS.UBT⁻¹.an⁻¹ couvrant 0 à 41 % des besoins fourragers des animaux (Tableau IX). Les pailles de céréales (maïs, sorgho, riz) constituaient le principal stock de fourrage dans les exploitations, suivis des fanes de légumineuses (arachide, niébé), des cultures fourragères (mucuna) et du foin en faible proportion chez un éleveur qui diversifie le fourrage stocké.

Tableau IX. Caractéristiques structurelles, indicateurs ENA et d'intégration agriculture-élevage

Variables	unité	Eleveurs			Agriculteurs			Agro-éleveurs	
		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 animale	UBT/ha	7,2	8,6	24,1	1,9	0,9	0,5	1,8	0,7
Indicateurs d'Ecological Network Analysis									
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
Efficience 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
Fourrage stockée 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

Avec : E= Eleveur ; A= Agriculteurs ; AE = Agro éleveurs ; FO = fumure organique

Les éleveurs ont les plus faibles quantités de fourrages stockés par unité de bétail (0 à 129 kgMS.UBT⁻¹.an⁻¹) leur permettant de couvrir seulement 0 à 6% des besoins de leurs animaux. Les fourrages stockés (résidus, pour certains du foin et d'autres des cultures fourragères) un peu de culture y sont distribués à des animaux gardés à la ferme pour des raisons sanitaires, pour l'embouche, dans l'attente d'un vêlage, en période d'allaitement ou de production laitière. Un des éleveurs (E4) a fourni un effort particulier de stockage de fourrage (plus de 8 tMS stocké) pour répondre à ses objectifs de production laitière, couvrant seulement en moyenne 6% des besoins de son grand troupeau.

Les agro-éleveurs et les agriculteurs présentaient de plus grandes quantités de fourrages stockées par unité de bétail ($175 \text{ à } 929 \text{ kgMS.UBT}^{-1}.\text{an}^{-1}$) 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 des parcours. Les efforts de stockage restaient plus réduits que chez les éleveurs (entre 0,9 et 3,2tMS stocké). Les fourrages sont distribués à l'ensemble des animaux pour suppléer le manque de fourrage en saison sèche. Les exploitations d'agro-éleveurs et d'agriculteurs présentant un chargement animal compris entre 1 et 2 avaient les taux de couverture des besoins des animaux les plus faibles (de 8 à 9%).

3.1.2. Production de fumure organique selon les types 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 ($1,4 \text{ à } 7,9 \text{ tMS}$) 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 $813 \text{ kgMS.UBT}^{-1}$.

. 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 ($1\,062 \text{ et } 1\,393 \text{ kgMS.ha}^{-1}$), principalement « de manière passive » à travers le parcage direct des troupeaux sur leur champ. Toutefois, certains éleveurs ont diversifié 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 ($58 \text{ à } 174 \text{ kgMS.UBT}^{-1}$).

Les agriculteurs et agro-éleveurs apportaient des doses moyennes à réduites de fumure organique à l'hectare ($227 \text{ à } 812 \text{ kgMS.ha}^{-1}$), même s'ils pouvaient consentir des efforts importants pour produire de la fumure organique par unité de bétail ($321 \text{ à } 813 \text{ kgMS.UBT}^{-1}$). Le faible effectif d'animaux poussait 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.

3.2. Effet de la structure des exploitations et des pratiques d'IAE sur le réseau de flux d'énergie brute

3.2.1. 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 compartiment et de flux internes possibles dans le réseau. Une Li/n inférieure à 2,2 souligne

l'absence de certains flux entre compartiments, et traduit 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 agro-éleveurs et agriculteurs (Tableau IX). Li/n était négativement corrélée à la taille du troupeau ($p\text{-value}<0,05$) et au chargement animal ($p\text{-value}<0,01$). 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 (F30) et de résidus pour la production de fumure (F5). 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 (F1) et de distribution de fourrage (F2). Li/n était positivement corrélée à la production de fumure organique par unité de bétail ($p\text{-value}<0,05$). La production de fumure organique complexifiait le système de production car la production de fumure organique s'appuyait sur une multiplicité de sources de biomasse impliquant des flux : ramassage des ordures ménagères (F27), collecte des déjections animales (F3), des refus de fourrage (F4), et des résidus de culture (F5), épandage de fumure au champ (F6). De plus, pour produire de la fumure organique, elles pratiquaient l'affouragement des animaux stabulés (fourrage stocké F1 et distribué F2). Il n'y a pas de corrélation entre le stockage de résidus de culture et la densité des liens.

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

L'activité du réseau (TST) a varié de 416 348 à 3 518 540 MJ. Elle était plus faible chez les agriculteurs, intermédiaire chez les agro-éleveurs et plus élevée chez les éleveurs. Elle était positivement liée à la taille du troupeau ($p\text{-value}<0.0001$). 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 (PL) a varié de 1,4 à 3 pour l'ensemble des exploitations. Elle est plus faible chez les éleveurs que chez les agriculteurs et les agro-éleveurs. Elle est négativement corrélée au chargement animal ($p\text{-value}<0,05$). 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 agro-éleveurs et agriculteurs a engendré 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 agro-éleveurs et négativement corrélée au chargement animal ($p\text{-value} < 0,05$). Chez les éleveurs, l'activité du réseau s'appuie 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 (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 ou 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 ($p\text{-value} < 0,01$) et au taux de recyclage interne ($p\text{-value} < 0,01$). La forte production de fumure organique par unité de bétail s'appuie sur une diversité de mode 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 (F3), collecte des refus de fourrage (F4), ramassage des ordures ménagères (F27) et compostage des résidus de culture (F5).

La production de fumure organique par hectare était négativement corrélée à l'intensité de recyclage ($p\text{-value} < 0,05$) et au taux de recyclage interne ($p\text{-value} < 0,05$). Aucune corrélation n'a été observée avec l'efficacité de recyclage (Figure 18). La production de fumure organique par hectare était fortement liée aux importations d'énergie brute ($p\text{-value} < 0,05$) 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 semblait 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 19). Le stockage de résidus de culture (F1) engendre une propagation d'énergie brute entre les compartiments de l'exploitation à travers plusieurs flux internes : distribution de fourrage (F2), collecte de déjections animales (F3) et de refus de fourrage (F4), épandage de fumure sur les champs (F6). Ces flux n'existant pas dans les systèmes où l'alimentation est assurée principalement par vaine pâture (F21, sans stockage).

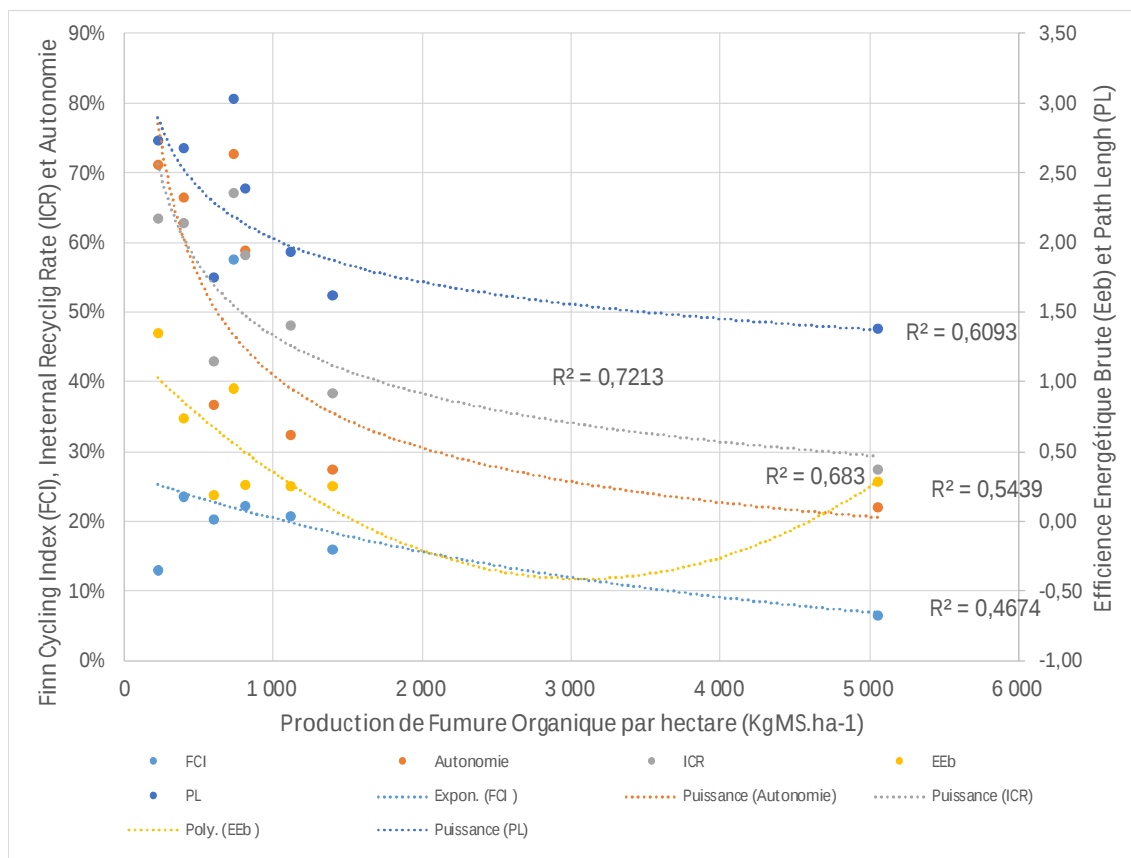


Figure 18. Relation entre la production de fumure organique par hectare cultivé et les indicateurs d'analyse de réseau écologique des exploitations familiales dans l'ouest du Burkina Faso

FCI : Finn cycling index ; ICR : internal recycling rate ; EEB : effience énergétique brute ; PL : path length

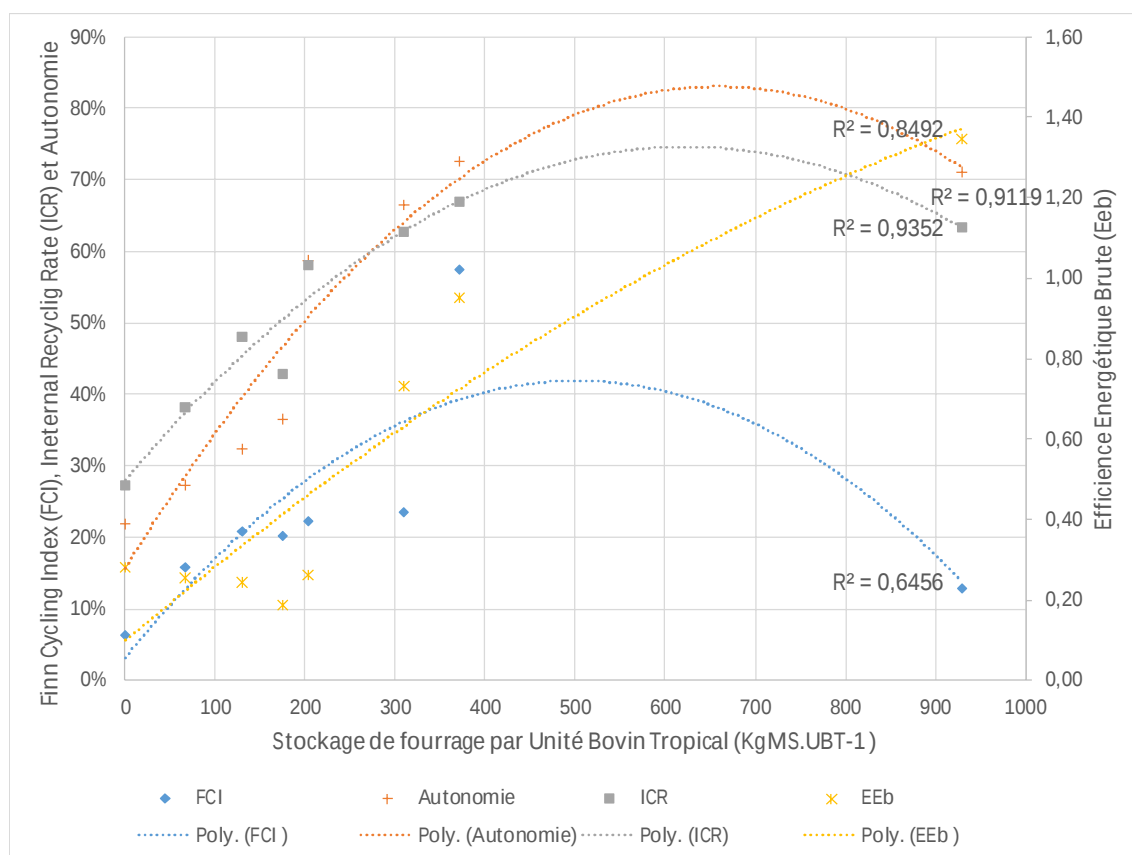


Figure 19. Relation entre le stockage de fourrage par unité de bovin tropical et les indicateurs d'analyse de réseau écologique des exploitations familiales dans l'ouest du Burkina Faso

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 en (Figure 19), sous-entend que le stockage des résidus de culture n'est pas la seule pratique améliorant le recyclage. Le recyclage de l'énergie brute se fait également à travers la vaine pâture des résidus de culture par les animaux de l'exploitation. Un recyclage qui pouvait être limité si les résidus de culture étaient prélevés par des animaux extérieurs à l'exploitation. L'énergie brute accumulée était alors exportée, augmentant l'efficacité énergétique brute.

3.2.3. 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 agro-éleveurs. Elle était négativement corrélée au chargement animal (p -value<0,05) et à la taille du troupeau (p -value<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 classent en deux gammes de valeur selon l'efficacité énergétique brute (EEb) selon l'absence ($0,19 \leq EEb \leq 0,28$) ou la présence d'un assolement en coton ($0,73 \leq EEb \leq 1,34$). 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 ($p\text{-value} < 0,01$; Figure 18). La stabulation des animaux et l'affouragement des animaux qui permettent une production de fumure organique par unité de bétail importante améliore l'autonomie des exploitations.

La production de fumure organique par hectare était négativement corrélée à l'autonomie ($p\text{-value} < 0,05$) et l'efficacité énergétique brute ($p\text{-value}$) 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 ($p\text{-value} < 0,05$) et l'efficacité énergétique brute ($p\text{-value} < 0,01$) des exploitations familiales mixtes (Figure 19). Le stockage de fourrage diminue les importations par prélèvement des animaux sur les parcours et sur les champs extérieurs.

4. DISCUSSION

4.1. Indicateurs d'ENA

La densité des liens (Li/n) au sein d'une exploitation familiale mixte, respectant le modèle conceptuel proposé, est comprise entre 0,75 (pas d'IAE active ou passive, 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. Reardon (1994) et Dalsgaard et Oficial (1997) 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 (Reardon, 1994 ; Nianogo et Somda, 1999) par une multiplication des sources de revenus.

Le recyclage de l'énergie brute est variable d'une exploitation à l'autre ($6 \leq FCI \leq 58\%$) selon le niveau de stockage des résidus de culture, l'utilisation des résidus de cultures et la production de fumure organique. Il est plus important que le niveau de recyclage de l'azote obtenu dans les exploitations familiales mixtes au Brésil, à Cuba et en Guadeloupe ($0 \leq FCI \leq 28\%$, (Stark, 2016), à Madagascar ($2,5 \leq FCI \leq 4,4\%$) (Alvarez *et al.*, 2014) et en Ethiopie ($0,9 \leq FCI \leq 11\%$) (Rufino *et al.*, 2009b). Le recyclage de l'azote s'accompagnant de déperdition importante (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 une des caractéristiques essentielles à la stabilité du fonctionnement des écosystèmes (Allesina et Ulanowicz, 2004).

Les efficacités énergétiques brutes (EEb) obtenues dans cette étude sont plus faibles que celles obtenues par (Vigne, 2012) au Mali-Sud ($0,4 \leq EEb \leq 5,12$). Cette étude s'appuyait sur un modèle conceptuel des exploitations unique 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, Brésil et Guadeloupe. Lorsque la famille est incluse dans le système, les quantités de produits agricoles et animaux échangés avec l'extérieur diminuent, respectant l'objectif premier de satisfaction des besoins alimentaires de la famille (Rufino *et al.*, 2009b).

4.2. 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 améliorent 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. La production de fumure organique peut s'appuyer, par contre, 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* (Landais et Lhoste, 1993 ; Dugué, 1998).

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 inflows. 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 (Rufino *et al.*, 2009b ; Edwards *et al.*, 1993 ; Vayssières *et al.*, 2011). Elle permet d'accroître le recyclage et l'autonomie par l'utilisation des coproduits produits sur l'exploitation pour substituer les intrants (Powell *et al.*, 2004 ; Vayssières *et al.*, 2011).

4.3. 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 (Lhoste, 2004a), l'impossibilité de collecter les déjections des animaux en mobilité et des surfaces cultivées insuffisantes face aux besoins en fourrage, même en production intensive. 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.*, 2013b). 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). 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 agro-éleveurs 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 pure, associée, en dérobée, sylvopastoralisme) pourrait permettre d'améliorer le recyclage des co-produits à travers l'affouragement des animaux tout en améliorant la fertilité des sols (Coulibaly, 2012). Ces marges de manœuvre pourraient permettre d'améliorer l'autonomie, le recyclage et les performances des exploitations familiales mixtes.

4.4. Les choix d'application de la méthode ENA

La méthode ENA est non statique, et lors de la conceptualisation et la modélisation du réseau, des choix peuvent être fait (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, 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 hautes 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'efficience car cela met en jeu des inflows et outflows (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, F8, F22) qui participe à la diversification des activités. Exclure la

famille du système, c'est ignorer l'autoconsommation du système étudié. Rufino *et al.* (2009b) et Alvarez *et al.* (2014) 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 sont fortement dépendant 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 biodigester/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 du travail et du transport avec des pratiques d'IAE actives impliquant du travail, du transport et un processus biophysique de dégradation de la matière au cours du stockage et des pratiques d'IAE passives où les flux sont supportés par le déplacement des animaux qui viennent consommer des résidus en vaine pâture et déposer leurs déjections directement au champ.

5. CONCLUSION

L'analyse des réseaux de flux d'énergie brute par la méthode ENA a montré une faible diversité du réseau de flux due à l'option d'agrégation de compartiments ; le niveau d'agrégation offre une faible description des pratiques d'IAE alors que la diversification des activités est une stratégie de diversification des revenus des ménages. Le recyclage de l'énergie brute est 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 est également faible dans ces exploitations et dépend de la présence d'une sole de coton. Cette culture augmente le poste des exportations améliorant ainsi l'efficacité énergétique. Enfin, l'autonomie des exploitations est variable de faible à élevée et s'explique par l'effectif des troupeaux qui implique de fortes importations de fourrages des pâturages. Les exploitations restent dépendantes du milieu extérieur.

Certaines pratiques d'IAE améliorent le recyclage, l'autonomie et l'efficacité énergétique. Le stockage des résidus de culture améliore l'autonomie, le recyclage et l'efficacité énergétique des exploitations familiales mixtes car il permet une réduction des importations de fourrage en saison sèche dans les exploitations ayant des résidus de culture disponible sur pieds. Cette

réduction améliore l'autonomie et l'efficacité énergétique et permet de créer des flux internes améliorant le recyclage.

La production de la fumure organique par unité de surface s'appuie sur une importation de fourrages issus des pâturages, ce qui n'améliore pas l'autonomie et l'efficacité énergétique. Cette autonomie diminue même considérablement avec une taille du troupeau même si elle implique des transferts de fertilité depuis le milieu extérieur. Toutefois la production de fumure organique par unité de bétail améliore 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'est pas optimal à cause d'une faible disponibilité de la main d'œuvre, de capacités de transport limitées, 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, même en production intensive, et par la possibilité de valoriser une diversité d'espaces et de ressources à travers la mobilité des animaux. 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).

⁴CHAPITRE V: ROLE DE L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE DANS LA MOBILISATION DES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIE : EVALUATION PLURI-ENERGIE DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE ELEVAGE DE L'OUEST DU BURKINA FASO

Crop-livestock integration role in different energy forms mobilized: Pluri-energy assessment of mixed farming systems in western Burkina Faso

Résumé

Un regain d'intérêt pour les exploitations de polyculture élevage est observé partout dans le monde. L'intégration agriculture-élevage (IAE) mise en œuvre dans ces exploitations contribuerait à la durabilité de l'agriculture en mobilisant plus d'énergie renouvelable que non renouvelable et en optimisant l'efficacité d'utilisation de ces ressources. A partir de suivis et d'enquêtes de huit (8) exploitations de polyculture-élevage diversifiées de l'Ouest du Burkina Faso et de l'application de l'analyse pluri-énergétique, nous proposons de décrire le fonctionnement énergétique d'une diversité d'exploitations de polyculture-élevage pratiquant l'IAE en prenant en compte les différentes formes d'énergies et d'étudier les liens entre les pratiques d'IAE mises en œuvre et les profils énergétiques (consommation, production, efficacité) des exploitations. Les résultats montrent un gradient d'IAE des exploitations permettant de classer les exploitations en IAE active (IAE_A), intermédiaire (IAE_{AP}), IAE passive (IAE_P). Ce gradient détermine le mode de fonctionnement énergétique des exploitations. A l'échelle des cultures, les exploitations à IAE_A consomment une quantité importante d'énergie fossile (EF) et d'énergie du travail (ET), due à la présence de la culture du coton, pour produire une quantité moyenne d'énergie brute (EB). Les exploitations à IAE_P consomment beaucoup d'EB due à la couverture des besoins en fumure organique et peu d'EF pour obtenir les meilleures productions d'EB liées à des productivités des cultures élevées. Les exploitations IAE_{AP} ont un fonctionnement intermédiaire entre les deux avec de très faibles productivités. A l'échelle des troupeaux, les exploitations à IAE_A consomment plus d'EF et d'ET due à la stabulation des animaux, suivies des exploitations IAE_{AP} et enfin des exploitations à IAE_P. La productivité de ces systèmes est similaire due aux fonctions physiologiques des ruminants

⁴ Article en préparation à soumettre à *Journal of Agricultural Science*

Bénagabou O.I.^{1,2,4}, Blanchard M.⁵, Vigne M.^{1,2}, Vayssières J.³, Vall E.³, Lecomte P.³ & Bougouma V.⁴, Nacro H. B.⁴

¹ CIRDES, USPAP, 01 B.P. 454 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

² CIRAD, UMR SELMET, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

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

³ CIRAD, UMR SELMET, F-34398 Montpellier, France

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

⁴ UPB, IDR, 01 B.P. 1091 Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

⁵ NIAS, Hanoi, Vietnam

(digestion et excrétion). A l'échelle des cultures et des troupeaux, les exploitations IAE_P ont les meilleures efficacités énergétiques fossiles (EEF) alors qu'à l'échelle des cultures les exploitations à IAE_A ont les meilleures EEB suivies des exploitations à IAE_{AP} et IAE_P. Dans l'ensemble, les trois pratiques d'IAE sont corrélées à l'EEF à différentes échelles. La traction animale via le travail humain et animal améliore l'EEF à l'échelle de l'exploitation (r^2 0,59). La production de fumure organique améliore l'EEF à l'échelle du système de culture (r^2 0,88). Le stockage des fourrages réduit l'EEF à l'échelle du système d'élevage (r^2 0,84). La diversité des exploitations participe différemment à la durabilité environnementale des systèmes de productions.

Mots clefs : intégration agriculture-élevage, analyse pluri-énergie, Efficacité énergétique, productivité, durabilité.

Abstract

A regain interest in crop-livestock systems is observed around the world. The crop-livestock integration (CLI) implemented in these farms would contribute to the sustainability of agriculture by mobilizing more renewable than non-renewable energy and optimizing the efficiency use of these resources. Based on follow-ups and surveys of 8 diversified mixed polyculture-livestock systems in western Burkina Faso, we propose to describe of crop-livestock systems energy functioning practicing CLI considering different forms of energy and to study the links between CLI practices implemented and the energy profiles (consumption, production, efficiency) of the farms. The results show CLI gradient of allowing to classify farm systems in active CLI, active-passive CLI, passive CLI. This gradient determines farms energy functioning mode. At crop level, CLI_A farms consume fossil energy significant amount (FE) and labor energy (LE) due to the presence of cotton culture to produce a gross energy (GE) average amount. The CLI_P farms consume a lot of EB due to the coverage of organic manure needs and little FE to obtain the best crop productivity. The CLI_{AP} have an intermediary functioning between the two with very low productivity. At the livestock level, CLI_A farms consume more FE and LE due to animal housing, followed by CLI_{AP} and finally at CLI_P. The productivity of these systems is similar due to the physiological functions of ruminants (digestion and excretion). At the crop and livestock level, CLI_P farms have the best fossil energy efficiencies (FEE) while at the crop scale the CLI_A farms have the best GEE followed by the CLI_{AP} and CLI_P farms. Overall, the three CLI practices are correlated with FEE at different scales. Animal and human work enhances FEE at the farm level, organic manure production improves FEE at the crop scale, and forage storage reduces FEE for herds. Farms diversity contributes differently to environmental sustainability.

Key words: crop-livestock integration, pluri-energy analysis, Energy efficiency, productivity, sustainability.

1. INTRODUCTION

Source d'émission de gaz à effet de serre (GES) impliquées dans le changement climatique observé ces dernières décennies (Gerber *et al.*, 2014), les activités agricoles sont devenues un sujet environnemental sensible. Selon les estimations de la FAO, la contribution du secteur d'élevage aux émissions de GES seraient responsables de 14,5 % des émissions anthropiques mondiales (Gerber *et al.*, 2014). Les principales sources d'émissions associées à l'élevage proviennent de l'émission de méthane (CH₄) par la fermentation entérique et la gestion des déjections animales (40% des émissions), des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) lors de la fertilisation minérale et organique (24%) et des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) par la consommation d'énergie fossile directe et indirecte (transport, conservation des produits ; 20%) (Gerber *et al.*, 2014).

De plus, la population mondiale passera de 7,3 milliards d'habitants en 2015 à 9,7 milliards en 2050 selon les prédictions de l'ONU (United Nations, 2015). Cette augmentation sera particulièrement importante dans les pays en développement. Il est attendu un doublement de la population sur le continent africain d'ici à 2050 (1,1 milliard en 2015 à 2,4 milliards en 2050 ; (United Nations, 2015). La production agricole devra satisfaire les besoins alimentaires d'une population croissante, de plus en plus urbaine (Tiffen, 2004) et au régime alimentaire changeant (Garnett *et al.*, 2013). La croissance de la consommation de produits animaux (lait, viande, œuf...), exacerbe la nécessité d'un accroissement des productions animales (Pingali, 2007 ; Rae *et al.* 2010).

L'activité agricole dans les pays industrialisés est construite sur un modèle productiviste dépendant de la consommation d'énergie fossile directe et indirecte à travers l'utilisation d'une quantité importante d'intrants agricoles, fabriqués, transformés et transportés par de l'énergie fossile et un taux de motorisation élevé (Bochu *et al.*, 2005 ; Benoit *et al.*, 2010 ; Pellegrini et Fernández, 2018). Il semble difficile de mettre à contribution ces systèmes pour accroître la production alimentaire mondiale car la croissance de la productivité dans ces systèmes semble aujourd'hui avoir atteint un palier (Gallais *et al.*, 2010). En effet, ils sont répartis dans des territoires où l'espace est limité et s'appuie largement sur l'énergie fossile dont les réserves sont menacées d'épuisement et d'une forte hausse de prix (Asafu-Adjaye, 2000 ; Bauquis, 2001 ; Gohin et Chantret, 2009 ; Tissot, 2001) même si certains efforts d'économie d'énergie fossile (EF) ou de substitution par des énergies renouvelables sont réalisés (Cascailh *et al.*, 2012).

Ces éléments conduisent à penser à des zones moins saturées, ou, dont la productivité peut être améliorée pour accroître la production, afin de nourrir le surplus d'habitants à l'horizon 2050. Les pays en voie de développement peuvent être des zones cibles. La majorité des exploitations de ces zones sont familiales, pratiquent la polyculture-élevage et caractérisées par une faible consommation d'EF (Ziesemer, 2007), une très faible productivité des systèmes de production (De Ridder *et al.*, 2015 ; Douchamps *et al.*, 2016) et une relative faible emprise agricole (Paillard *et al.*, 2010). Ces systèmes pourraient contribuer à relever le défi posé à l'agriculture que sont : produire « *plus avec moins* » (Cassman, 1999 ; Griffon, 2014), « plus » pour faire face à la demande alimentaire toujours croissante en mobilisant « moins » de ressources en raréfaction (Tilman *et al.*, 2002) ; s'adapter aux nouvelles contraintes économiques, sociales et environnementales (Darnhofer *et al.*, 2010).

La zone agropastorale de l'Ouest du Burkina Faso par exemple est composée en majorité d'exploitations de polyculture-élevage (Coulibaly, 2012 ; Vall *et al.*, 2006a ; Vall et Diallo, 2009). Elles sont caractérisées par une faible productivité des systèmes de production (Koutou *et al.*, 2016) liée entre autres à une utilisation limitée d'intrants agricoles (Ouedraogo *et al.*, 2016) et une mobilisation réduite de l'énergie fossile (Bénagabou *et al.*, 2013 ; Vigne *et al.*, 2014), due à des revenus faibles et à des difficultés d'accès aux marchés (Traoré *et al.*, 2013 ; Koutou *et al.*, 2017).

Ces exploitations sont aussi caractérisées par la mise en œuvre de l'intégration agriculture-élevage (IAE). Cette pratique permet l'échange de flux de matière, d'énergies ou d'argent entre le système agricole et le système d'élevage et repose pour cela sur 3 piliers biotechniques : (i) l'usage de l'énergie animale pour le système de culture via la *traction animale* ; (ii) l'utilisation de fourrages issus des résidus de culture (RDC) et des cultures fourragères stockées pour *l'alimentation des animaux* ; et (iii) la production de la *fumure organique* (FO) issue des déjections animales et du recyclage des RDC pour le maintien et l'amélioration de la fertilité des sols (Landais et Lhoste, 1990 ; Lhoste, 2004 ; Smith *et al.*, 1997). L'IAE est reconnue comme pouvant contribuer à relever le défi de l'agriculture durable puisqu'elle représente une alternative pour améliorer durablement la productivité des systèmes agricoles (Herrero *et al.*, 2010) en mobilisant les processus écologiques (FAO, 2015).

Il apparaît que chaque pilier de l'IAE promeut la consommation d'une ou plusieurs formes d'énergies. Ainsi, l'intensité du recours à la traction animale se retrouve dans l'énergie liée au travail alors que l'utilisation de fourrages issus des résidus de cultures et de FO peut se traduire par l'énergie brute qu'ils contiennent. L'alimentation des animaux peut également retranscrire quant à elle l'énergie solaire mobilisée pour les produire. Enfin, l'ensemble de ces piliers peuvent représenter des consommations d'énergie fossile indirectes pour produire les ressources mobilisées.

La littérature d'Afrique de l'Ouest présente quelques études récentes sur l'IAE et l'utilisation de ces différentes formes d'énergies dans les exploitations de polyculture-élevage. L'efficacité d'utilisation de cette énergie fossile (EEF) est ainsi reconnue comme élevée et la consommation d'EF comme très faible dans les exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso (Bénagabou *et al.*, 2013) et du Sud du Mali. Dans les exploitations présentant une autonomie faible, la consommation élevée d'énergie brute résultante est quant à elle, à l'origine d'une faible efficacité d'utilisation de cette énergie (Bénagabou *et al.*, 2017). L'énergie liée au travail animale permet d'améliorer l'EEF dans ces exploitations au Mali (Vigne, 2012) et au Burkina Faso (Bénagabou *et al.*, soumis). Cependant, il existe peu de travaux portant sur l'effet combiné des autres piliers de l'IAE (RDC, FO) sur la consommation des diverses formes d'énergies, renouvelable (énergie brute, liée au travail et solaire) et non renouvelable (EF) dans ces systèmes. Prendre en compte l'ensemble des formes d'énergies consommées et produites sur les exploitations de polyculture-élevage permettra de comprendre l'effet de ces pratiques d'IAE pour le développement d'une agriculture durable.

A travers l'application d'une analyse pluri-énergétique (Vigne *et al.*, 2013) permettant la mise en lumière du fonctionnement énergétique d'une diversité d'exploitations de polyculture-élevage, il s'agit de questionner (i) le lien entre les pratiques d'IAE et la mobilisation des différentes formes d'énergies, et (ii) la contribution de l'IAE à l'intensification écologique des exploitations de polyculture-élevage.

2. METHODOLOGIE

2.1. Site d'étude et exploitations étudiées

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'', longitude 4°24'010''). Le climat y est soudano-guinéen avec une saison des pluies de mai à octobre (1 000 mm.an⁻¹), une saison sèche froide d'octobre à février et une saison sèche chaude de mars à avril. Les fortes densités humaines (55 hab.km⁻²) et animales (48 UBT.km⁻²; avec UBT : unité bovin tropical), et l'importante emprise agricole (53% du territoire) engendrent des compétitions fortes pour l'accès aux ressources naturelles aboutissant à des conflits courants entre les usagers (Vall *et al.*, 2006b ; Vall et Diallo, 2009).

Une typologie des exploitations de polyculture-élevage de la zone comprenant 3 types a été proposée précédemment (Vall *et al.*, 2006a , 2011) : (i) les *agriculteurs* (A) principalement orientés vers les productions agricoles produisant coton et céréales (3 à 12,5 ha) destinés à la vente et à l'autoconsommation et possédant un élevage principalement d'animaux de trait

(<10 bovins) ; (ii) les *éleveurs* (E) orientés vers les productions animales avec des grands troupeaux de bovins (>10 à plus de 110 bovins) et cultivant de petites surfaces agricoles (<7,5 ha) et (iii) les *agro-éleveurs* (AE) développant les deux activités avec de grands 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 avec 3 agriculteurs, 2 agro-éleveurs et 3 éleveurs (Tableau X).

Tableau X. Caractéristiques structurelles des exploitations de polycultures-élevage étudiées

	E1	E4	E8	AE5	AE6	A2	A3	A7
Surface totale cultivée (ha)	4,2	7,5	1,8	9	14,2	3	4	6,6
Part assolement en coton (%)	0%	0%	0%	0%	39%	0%	50%	42%
Taille du troupeau (UBT)	30,2	64,1	43,5	16,1	10	5,6	3,6	3,5
Chargement animale (UBT/ha)	7,2	8,6	24,1	1,8	0,7	1,9	0,9	0,5

ha : hectare ; UBT : unité bovin tropical ; IAE : intégration agriculture-élevage ; P : passive ; AP : intermédiaire ; Ac : active ; E : éleveur ; AE : agro-éleveur ; A : agriculteur

Le choix du village et des exploitations étudiées se base sur l'existence d'un panel de données et d'une expertise sur les pratiques d'IAE et les flux de biomasse (Vall *et al.*, 2011 ; Bénagabou *et al.*, 2013) et de la récente implication des producteurs dans les projets de recherche action en partenariat garantissant l'implication des producteurs dans la recherche et la fiabilité des données collectées (Vall et Chia, 2014). Le choix de l'approche par étude de cas, basé sur un petit nombre d'exploitations représentatives suivies s'explique par les contraintes financières, temporelles et humaines du suivi mensuel des flux de biomasse, des temps de travaux et des pratiques d'IAE.

2.2. Caractérisation de l'intégration agriculture-élevage

Une série d'indicateurs caractérisant les pratiques d'IAE mises en œuvre dans les exploitations de polyculture-élevage ont été calculés : (i) la quantité de résidus de culture et de fourrage (autoproduits et importés) stockés rapportée à la taille du troupeau (en kg MS.UBT⁻¹.an⁻¹), la couverture des besoins fourrager (%) et la part des fanes et cultures fourragères dans le stock fourrager (%) ; (ii) la production annuelle de fumure organique rapportée à la surface cultivée (en kg MS.ha⁻¹.an⁻¹) traduisant une IAE passive ; (iii) 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. Le niveau de performance de ces pratiques est estimé à travers la couverture des besoins alimentaires des animaux permis par le stockage de fourrage (en % de 6,5 kg MS.j⁻¹.UBT⁻¹) (Boudet, 1984) et la

couverture des besoins en fumure organique des sols (en % de 2,5 t MS.ha⁻¹.an⁻¹) (Berger *et al.*, 1987). Enfin, l'investissement en travail humain et animal a permis d'évaluer la place de la traction animale dans l'exploitation.

2.3. Application de la méthode d'analyse pluri-énergétique

2.3.1. Principes de base

La méthode d'analyse pluri-énergétique, conçue par Vigne *et al.* (2013), débute par une conceptualisation d'un système générique (Figure 14) s'appuyant sur 3 règles fondamentales.

La première règle s'appuie sur la comptabilisation de quatre types d'énergies utilisées dans les systèmes agricoles étudiés : l'énergie fossile (EF), l'énergie brute (EB), l'énergie liée au travail (ET) et l'énergie solaire (ES). L'EF correspond au combustible fossile consommé directement sur l'exploitation (carburants, électricité et gaz) ou indirectement pour produire les intrants des cultures (fertilisants, semences, phytosanitaires et eau d'irrigation), des troupeaux (fourrages, concentrés, soins vétérinaires et animaux de renouvellement) ainsi que les équipements agricoles (matériel et bâtiments). L'EB correspond à l'énergie calorifique contenue dans les produits animaux et végétaux ainsi que l'énergie renouvelable produite sur l'exploitation telle que l'électricité photovoltaïque. L'ET correspond à l'énergie dépensée lors des travaux agricoles réalisés par les animaux de trait ou les humains sur l'exploitation. Enfin, l'ES correspond au rayonnement photosynthétiquement actif (pour *photosynthetically active radiation*, PAR) qui est la part du rayonnement solaire dans les longueurs d'onde 400-700 nm directement reçue par les cultures de l'exploitation.

La seconde règle consiste en la division des systèmes étudiés en composantes. Afin de concevoir un système le plus générique possible, nous avons retenu sept composantes : (i) les infrastructures qui contiennent le matériel et les bâtiments de l'exploitation ; (ii) le troupeau qui inclue les animaux en production et les animaux nécessaires à la traction animale ; (iii) les surfaces agricoles directement utilisées par l'exploitation ; (iv) le stockage des productions végétales nobles ; (v) le stockage des résidus de culture et fourrage ; (vi) le stockage de la fumure organique ; et (vii) la famille. La division des systèmes en composantes permet de mener conjointement une analyse globale des systèmes étudiés et une analyse plus fine de chaque composante.

La troisième règle considère la prise en compte de tous les flux d'énergies entrant dans le système (*inflows*), circulant à l'intérieur du système entre les différents compartiments (*internalflows*) et quittant le système (*outflows*). Soixante-sept flux potentiels ont été énumérés dans la présente étude (Figure 14 à la page 56).

L'application aux systèmes agricoles de cette méthode suit cinq étapes successives : (i) lister les flux propres au système étudié parmi les 67 flux génériques , (ii) calculer les coefficients énergétiques des flux des quatre formes d'énergies (fossile, brute, travail et solaire) ; (iii) collecter les données brutes sur l'exploitation portant sur les sept composantes du système étudié, (iv) transformer les données brutes collectées en flux d'énergies à l'aide des coefficients d'énergies ; (v) calculer les indicateurs énergétiques classés en trois catégories (les consommations, les productions et les efficacités d'énergies) pour les trois échelles d'analyse (exploitation, culture et troupeau).

2.3.2. Collecte de données

La collecte des données s'est appuyée sur un suivi mensuel fin des flux d'énergies dans les huit exploitations. Le suivi mensuel des flux dans les exploitations de polyculture-élevage est une recommandation issue d'une précédente étude (Bénagabou *et al.*, 2013) visant à améliorer la précision des données sur les flux d'énergies mis en oeuvre dans ces exploitations sans système d'enregistrement des pratiques (pas d'enregistrement des intrants utilisés, des achats, des ventes ...). En effet, le renseignement des 67 flux identifiés par une enquête du chef d'exploitation sur ses pratiques et le fonctionnement de son exploitation en un passage unique ne semble pas permettre d'obtenir des données précises et fiables. Or, la quantification des flux d'énergies étant une étape importante de l'application de la méthode pluri-énergie, il apparaît primordial de détenir des données détaillées sur la quantification des flux se produisant entre les divers compartiments pour permettre une compréhension fine des pratiques individuelles (Bernard *et al.*, 2011 ; Hostiou et Dedieu, 2009 ; Muchagata et Brown, 2003).

Un livret de suivi a donc été élaboré (annexe 3) afin de collecter les données nécessaires à la quantification des 67 flux identifiés précédemment. La Figure 14 à la page 56 représente les 4 modèles conceptuels de flux d'énergie fossile, brute, du travail et solaire utilisés. Il s'articulait autour de 7 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. Le suivi a été réalisé en 20 mois (de mai 2013 à décembre 2014) car certains flux de biomasse (EB₃, EB₄, EB₆ et EB₂₂) correspondaient à des activités s'étendant sur plus d'une année agricole (18 mois). Certaines données ont été mesurées tandis que d'autres ont été déclarées par le producteur quand cela était suffisant (Tableau XVI). Les flux ne pouvant être mesurés ou déclarés ont été estimés à partir des données de références dans la zone ou des données issues du terrain.

Certaines quantités de biomasses ont été mesurées à l'aide de pesons adaptés (5 kg à 100 kg), sur un échantillon représentatif (5 à 10 répétitions), avec dans certain cas une collecte

d'échantillons pour l'établissement de la teneur en matière sèche à l'étuve. Il s'agissait spécifiquement de l'épandage de la fumure organique, de l'usage des semences et d'engrais, de la distribution d'aliment et de fourrage aux animaux, de la production de refus de fourrage et de déjections animales, du stockage de la production agricole et des résidus de culture, de la consommation de bois de chauffe. Les bâtiments de l'exploitation pour le stockage et les habitations ont été mesurés au mètre ruban. Enfin, certains temps de travaux réalisés par les hommes et les animaux ont été chronométrés (épandage de fumure organique, labour, semis, affouragement des animaux, nettoyage du parc), tout en précisant le nombre, le genre et l'âge des animaux ou des hommes réalisant le travail (voir Annexe 2 et Annexe 3).

Des données ont été collectées par déclaration mensuelle du chef d'exploitation, du berger ou d'un responsable d'activités en suivant la fiche de suivi des exploitations présentée en annexe 3. Il s'agissait des temps de travaux réalisés par la main d'œuvre familiale ou extérieure et les animaux de traction, ainsi que le nombre, le genre et l'âge des animaux ou des hommes réalisant les travaux de stockage des produits végétaux et des fourrages, de construction des bâtiments, de transport, de conduite des animaux au pâturage, ainsi que la location de main d'œuvre ou de travail animal à l'extérieur. Les données déclarées concernaient également l'autoconsommation et les ventes des productions végétales et animales, les achats de produits alimentaires, la consommation d'essence, les quantités de biomasse végétale mises en fosses, l'achat des intrants agricoles, des fourrages et des aliments bétails, la vente de fumure organique et de résidus de culture, les animaux morts et volés et le prélèvement des semences dans la production agricole.

Enfin, certaines données non accessibles par enquête ont dû être estimées. La consommation de fourrages sur les parcours, les champs et les champs extérieurs par le troupeau ou les troupeaux extérieurs a été estimée selon la couverture des besoins des animaux aux différentes saisons, l'accessibilité des différents milieux et leur production. De même, le dépôt des déjections animales sur les parcours, les champs en propriété et les champs extérieurs par le troupeau en propriété ou les troupeaux extérieurs a été estimé à partir de la consommation de fourrages sur ces différents milieux. Enfin, les productions d'ordures ménagères, de fèces et d'urine par la famille ont été estimées à partir de données de la littérature.

2.3.3. Calcul des coefficients énergétiques

Les coefficients énergétiques fossiles, représentant la consommation d'énergie fossile nécessaire à la production et au transport des différents intrants, ont été adaptés au contexte en s'appuyant sur une analyse en cycle de vie de chaque intrant consommé. Ils ont été adaptés à partir de données de la littérature au contexte local pour les combustibles fossiles

consommés (carburant, électricité...), les intrants agricoles et d'élevage, la consommation de produits alimentaires et non alimentaires de la famille ainsi que les infrastructures et le matériel. L'annexe 2 (Tableau XIX, Tableau XX, Tableau XXI, Tableau XXII, Tableau XXIII, Tableau XXIV) présente les coefficients énergétiques fossiles utilisés dans cette étude et leurs références.

Les coefficients énergétiques brutes des biomasses utilisées ont été obtenus dans la littérature. Ils correspondent à l'énergie calorifique contenue dans une unité de biomasse mobilisée dans le système (intrants, produit végétal ou animal). L'annexe 2 et le Tableau XVIII présentent les coefficients énergétiques brutes utilisés dans cette étude et leurs références.

Les coefficients énergétiques du travail sont obtenus à partir des données de la littérature. Ils correspondent à la quantité d'énergie dépensée par un humain ou un animal pour réaliser chacune des activités agricoles. Face à la diversité des activités dans les exploitations de polyculture-élevage et de la grande variabilité des coefficients présents dans la littérature, les coefficients énergétiques du travail pour les humains et les animaux effectuant les activités physiques dans cette zone d'étude ont été recalculés en prenant en compte le degré de pénibilité des activités et les valeurs extrêmes trouvées dans la littérature. L'annexe 2 et le Tableau XXV présentent la méthode de calcul utilisée et les coefficients énergétiques du travail obtenus.

Le coefficient énergétique solaire s'appuie sur le rayonnement photosynthétiquement actif (Photosynthetically Active Radiation, PAR) correspondant à la part du rayonnement solaire reçue réellement et utilisée pour la photosynthèse. La plage de longueur d'ondes du spectre solaire utilisable par les plantes est située entre 400 et 700 nm. La part du rayonnement réellement utilisée par les plantes varie selon le type d'appareillage utilisé pour la mesure ou selon l'espèce cultivée de 46 à 51% (Gosse *et al.*, 1986). Une valeur simplifiée de 50% du rayonnement solaire global a été considérée (Bonnet et Combarous, 1996). La valeur du rayonnement solaire global pour l'ouest du Burkina Faso est issue de l'outil SolarGIS (<http://solargis.info>) et est de $3,87 \cdot 10^7 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$; aucune mesure directe n'a donc été effectuée.

2.3.4. Calcul des indicateurs énergétiques

Trois catégories d'indicateurs énergétiques ont été calculées. Les consommations totales des différentes formes d'énergie (EF, EB, ET, ES) ont été calculées à travers la somme des flux d'énergies entrants dans le système pour l'énergie considérée (en MJ). Elles sont notées « *Total E consommée* », en précisant s'il s'agit d'EF, d'EB, d'ET ou d'ES. La production totale d'énergie est calculée uniquement pour l'énergie brute. Elle est la seule énergie considérée en flux sortant. Elle est notée « *Total EB produite* » (en MJ). L'efficacité énergétique est calculée à partir du rapport de la production d'énergie brute (en MJ) sur les consommations

totales d'énergies (en MJ). Elle est notée EEF, EEB, EET et EES (sans unité) selon qu'il s'agit d'EF, d'EB, d'ET ou d'ES.

Ces trois catégories d'indicateurs énergétiques sont calculées au niveau des trois échelles d'analyse (exploitation, système de culture et d'élevage). Les consommations et les productions sont exprimées en MJ.ha⁻¹ à l'échelle de l'exploitation et du système de cultures et en MJ.UBT⁻¹ à l'échelle du système d'élevage. Les indicateurs d'efficience restent sans dimension.

A l'échelle du système de culture et d'élevage, les consommations d'EF sont comptabilisées en tenant compte d'une allocation énergétique des ressources basées sur le contenu calorifique des produits échangés entre les deux composantes : les résidus de culture produits sur les champs et distribués aux animaux au sein de l'exploitation et la fumure organique contenant des déjections animales produites par les animaux de l'exploitation et épandue sur les champs. Les équations utilisées pour calculer l'ensemble des indicateurs sont détaillées dans le Tableau IV (voir page 60).

3. RESULTATS

3.1. Fonctionnement énergétique des exploitations de polyculture-élevage

3.1.1. Profils énergétiques à l'échelle de l'exploitation

Les facteurs structuraux impliquant une augmentation de la consommation d'EF par unité de surface (2 422 à 8 120 MJ.ha⁻¹) sont la taille du troupeau et la part du coton dans l'assolement. Le premier poste de consommation d'EF dans les exploitations de polyculture-élevage étudiées est lié à la consommation d'engrais et de produits phytosanitaires (7 à 88% de l'EF consommée, Tableau XI), même dans la majorité des exploitations d'éleveurs pourtant orientées vers les productions animales. La part de la consommation d'EF accordée à la consommation d'engrais et de produits phytosanitaires est particulièrement forte pour les exploitations avec une sole de coton (85 à 88% contre 7 à 66% sans coton). Chez les éleveurs, le second poste de consommation d'EF est lié aux quantités de fourrages consommées sur des champs extérieurs et les parcours (17 à 82%), suivi des soins vétérinaires (3 à 4%) illustrant leur investissement sur l'activité d'élevage. Les agriculteurs et les agro-éleveurs consomment de l'EF à travers l'usage de matériel agricole. La consommation de carburant et l'achat d'aliment pour la famille en cas de mauvaise production interviennent dans toutes les exploitations.

La consommation d'EB par unité de surface (18 231 à 893 070 MJ. ha⁻¹) augmente largement avec la taille du troupeau et dans une moindre mesure diminue avec la part du coton dans

l'assolement ($>50\,000\text{ MJ. ha}^{-1}$ sans coton contre $<25\,000\text{ MJ. ha}^{-1}$ avec coton). Le poste principal de consommation d'EB de l'ensemble des exploitations étudiées est lié à l'importation de biomasse des pâturages (43 à 100% de la consommation d'EB). La biomasse est importée depuis les parcours naturels pendant la saison des pluies, ou les bas-fonds en fin de saison sèche (43 à 93%), et depuis les champs extérieurs par vaine pâture après les récoltes (0 à 17%) dans le cas des grands troupeaux.

La consommation d'énergie du travail humain et animal à l'échelle de l'exploitation est faible (8 à 339 MJ.ha^{-1}) et très variable d'une exploitation à l'autre. Les exploitations étudiées se basent prioritairement sur la main d'œuvre familiale avec peu de recours aux travailleurs extérieurs.

Les productions d'EB de l'exploitation par unité de surface sont très variables allant de 13 009 à $290\,599\text{ MJ.ha}^{-1}$. Ces productions augmentent avec la taille du troupeau et dans une moindre mesure avec la part du coton dans l'assolement. Dans les exploitations qui ne produisent pas de coton, elles sont principalement composées des effluents d'élevage déposés sur les parcours naturels (56% à 80% de l'EB produite) et dans une moindre mesure ceux déposés sur les champs extérieurs (2 à 15%) et enfin les productions agricoles (4 à 18%). Dans les exploitations qui produisent du coton, la production d'EB est largement composée par les productions agricoles (graine de coton à forte valeur énergétique ; 50 à 80% de l'EB produite), et dans une moindre mesure par la production de résidus de culture qui seront consommés en vaine pâture (0 à 35%) et le dépôt de déjections animales à l'extérieur (7 à 18%).

Les EEF sont plus élevées dans les exploitations pratiquant l'élevage (13,3 à 35,8 contre 3,3 à 5,4), elles sont liées aux activités d'élevage faiblement consommatrice d'EF et fortement productrice d'EB. Au contraire l'EEB est améliorée par la présence de coton dans l'assolement (1,13 à 1,37 contre 0,21 à 0,33). Les meilleures EES sont obtenues par les exploitations ayant de grands troupeaux ($6,71.10^{-3}$ à $29,1.10^{-3}$) et dans une moindre mesure pour les exploitations cultivant du coton ($1,82.10^{-3}$ à $2,89.10^{-3}$) et plus limitée pour les exploitations sans coton ($1,33.10^{-3}$ à $1,46.10^{-3}$).

Tableau XI. Profils énergétiques à l'échelle des exploitations

	E1	E4	E8	AE5	AE6	A2	A3	A7
Total EF consommée (MJ/ha)	4 414	5 973	8 120	2 422	6 220	4 067	6 613	6 677
Carburant (%)	8%	15%	0%	10%	1%	7%	5%	2%
Engrais (%)	30%	41%	3%	34%	56%	21%	59%	65%
Effluent importé (%)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	3%
Phytosanitaire (%)	15%	8%	4%	32%	29%	17%	24%	23%
Semence (%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Concentré (%)	0%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Fourrage acheté (%)	0%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	0%
Résidus de culture pâturé (%)	22%	17%	82%	2%	0%	7%	0%	0%
CMV (%)	1%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%
Animaux achetés (%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Frais vétérinaire (%)	3%	3%	4%	2%	0%	1%	1%	0%
Bâtiment (%)	4%	1%	0%	2%	8%	1%	0%	1%
Matériel (%)	9%	7%	1%	11%	4%	17%	7%	4%
Aliment de la famille (%)	8%	3%	6%	5%	1%	29%	2%	1%
Travailleurs extérieur (%)	0%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	1%
Total EB consommée (MJ/ha)	256 267	297 082	893 070	50 916	18 231	66 439	23 403	24 509
Aliment de la famille (%)	1%	0%	0%	1%	4%	14%	2%	1%
Effluent importé (%)	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	45%
Effluent déposé (%)	0%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	10%
Animaux (%)	0,3%	0,0%	0,0%	0,1%	0,8%	0,8%	6,2%	0,8%
Pâturage extérieur (%)	99,1%	91,3%	99,8%	94,9%	85,9%	85,4%	90,9%	42,6%
sur champs extérieurs (%)	8,8%	7,8%	17,2%	2,2%	0,0%	10,6%	0,0%	0,0%
sur parcours (%)	90,2%	83,5%	82,6%	92,7%	85,9%	74,8%	90,9%	42,6%
Fourrage (%)	0,0%	3,4%	0,0%	3,5%	0,5%	0,0%	1,3%	0,0%
Aliment des animaux (%)	0,1%	3,7%	0,0%	0,7%	0,9%	0,0%	0,0%	0,0%
Total ET consommée (MJ/ha)	96	54	339	55	71	8	217	248
Part réalisée par les animaux (%)	8%	8%	5%	21%	19%	14%	6%	17%
Total EB produite (MJ/ha)	69 390	79 608	290 599	13 009	20 791	13 696	26 461	33 641
Produits végétaux (%)	9,2%	17,6%	5,3%	10,7%	50,0%	3,8%	80,8%	57,4%
Animaux (%)	4,3%	3,6%	0,0%	6,8%	0,0%	1,7%	1,5%	0,3%
Production de résidus (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	33,3%	0,0%	0,0%	35,4%
Production de lait (%)	0,0%	0,5%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Effluent cédé (%)	3,8%	1,3%	23,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Effluent déposé (%)	82,7%	76,9%	70,8%	82,5%	16,6%	94,5%	17,7%	6,8%
sur champs extérieurs (%)	9%	8%	15%	2%	0%	14%	0%	0%
sur parcours naturel (%)	74%	69%	56%	80%	17%	80%	18%	7%
EEF exploitation	15,7	13,3	35,8	5,4	3,3	3,4	4,0	5,0
EEB exploitation	0,27	0,27	0,33	0,26	1,14	0,21	1,13	1,37
EET exploitation	722	1 481	858	236	292	1 661	122	136
EES exploitation (10 ⁻³)	6,72	6,78	29,1	1,46	1,82	1,33	2,23	2,89

EF : énergie fossile ; EB : énergie brute ; ET : énergie du travail ; ES : énergie solaire ; EEF : efficacité énergie fossile ; EEB : efficacité énergie brute ; EET : efficacité énergie travail ; EES : efficacité énergie solaire ; UBT : Unité Bovin Tropical ; FO : fumure organique ; RDC : résidu de culture ; CMV : Complexe minéraux et vitamines ; E : éleveur ; AE : agro-éleveur ; A : agriculteur

3.1.2. Profil énergétique à l'échelle du système de culture

Une forte consommation d'EF sur le système de culture (intensification par les engrais et produits phytosanitaires ; >6 000 MJ.ha⁻¹ d'EF consommée), ne s'accompagne pas d'une amélioration des quantités d'EB produites (Tableau XII). Les consommations d'EF seules ne permettent donc pas d'améliorer exceptionnellement la productivité des systèmes de culture.

Chez les éleveurs, une consommation moyenne d'EF couplée à une consommation élevée d'EB semble permettre d'atteindre une forte productivité des systèmes de culture (>50 000 MJ.ha⁻¹ d'EB produite). Une amélioration de la productivité du système de culture semble possible par un investissement conjoint d'EF et d'EB.

A cette échelle, l'amélioration de l'EEF s'accompagne d'une réduction de l'EEB. Il semble impossible d'améliorer la productivité des systèmes de culture tout en essayant d'avoir conjointement une réduction des consommations d'EF et d'EB. Les deux facteurs semblent se compenser. Une forte consommation d'EB s'accompagne d'une faible consommation d'EF et permet une augmentation de la productivité du système de culture.

Tableau XII. Profils énergétiques à l'échelle du système de culture

	E1	E4	E8	AE5	AE6	A2	A3	A7
Total EF consommée (MJ/ha)	2 970	4 067	3 295	2 157	6 178	3 066	6 144	6 524
Carburant (%)	2%	3%	0%	2%	0%	2%	1%	0%
Engrais (%)	59%	74%	44%	46%	63%	42%	66%	69%
Effluent importé (%)	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	4%
Phytosanitaire (%)	30%	15%	47%	43%	33%	33%	27%	24%
Semence (%)	0%	0%	1%	0%	1%	0%	0%	0%
Bâtiment (%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Matériel (%)	7%	5%	1%	9%	2%	23%	5%	2%
Travailleurs extérieurs (%)	1%	0%	6%	1%	0%	0%	1%	1%
Part de EF totale consommée sur le système de cultures (%)	50%	55%	8%	74%	89%	50%	89%	95%
Total EB consommée (MJ/ha)	54 481	75 419	150 967	27 980	9 332	10 689	12 512	18 871
Effluent importé (%)	0%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	59%
Effluent épandu (%)	44%	34%	34%	44%	45%	59%	63%	13%
Effluent déposé par animaux (%)	0%	0%	0%	0%	16%	0%	0%	14%
Effluent déposé en VP interne (%)	56%	60%	66%	56%	39%	41%	37%	15%
Total ET consommée (MJ/ha)	271	245	360	425	588	701	432	507
Part réalisée par les animaux (%)	21%	30%	30%	34%	23%	23%	11%	22%
Total EB produite (MJ/ha)	51 245	71 848	84 470	30 449	40 523	22 044	37 814	53 883
Produits végétaux stockés (%)	55%	48%	38%	39%	39%	50%	42%	50%
Résidus en VP interne (%)	45%	52%	62%	61%	23%	50%	27%	13%
Résidus en VP externe (%)	0%	0%	0%	0%	38%	0%	31%	37%
Résidus non valorisés (%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	37%
EEF culture	17,25	17,67	25,64	14,12	6,56	7,19	6,16	8,26
EEB culture	0,94	1,01	0,56	1,09	4,34	2,06	3,02	6,93
EET culture	189	294	235	72	69	31	88	106
EES culture	4,96E-03	6,12E-03	8,45E-03	3,41E-03	2,80E-03	2,13E-03	2,22E-03	3,97E-03

EF : énergie fossile ; EB : énergie brute ; ET : énergie du travail ; ES : énergie solaire ; EEF : efficacité énergie fossile ; EEB : efficacité énergie brute ; EET : efficacité énergie travail ; EES : efficacité énergie solaire ; UBT : Unité Bovin Tropical ; FO : fumure organique ; RDC : résidu de culture ; E : éleveur ; AE : agro-éleveur ; A : agriculteur ; VP : vaine pâture

3.1.3. Profil énergétique à l'échelle du système d'élevage

A l'échelle du système d'élevage, on observe les consommations les plus faibles d'EF par unité de bétail chez les éleveurs (309 à 453 MJ.UBT⁻¹ d'EF consommée) malgré la forte part

de l'EF totale consommée par l'exploitation qu'ils consacrent au troupeau plus élevée chez les éleveurs (27% à 86% de l'EF consommée ; Tableau XIII).

La première forme de consommation d'énergie par le système d'élevage reste l'EB, sous forme de fourrages issus des parcours naturels et de RDC des champs. L'EB consommée par unité de bétail est cependant presque invariable d'une exploitation à l'autre. L'ingestion de biomasses par les animaux suit en effet une norme moyenne admise dans la région ($6,25 \text{ kg MS.UBT}^{-1}.\text{j}^{-1}$) avec un ajustement selon les niveaux de productions des animaux. Les pratiques des exploitations diffèrent cependant sur la manière de couvrir ces besoins. Chez les agriculteurs et les agro-éleveurs, les légères élévations de la consommation d'EB par UBT peuvent s'expliquer par la distribution d'aliments à l'auge aux animaux stabulés (7 à 30% de l'EB consommée) en complément de l'alimentation sur les parcours et en vaine pâture. Les éleveurs s'appuient sur une valorisation des parcours naturels et la vaine pâture externe (81,5 - 94,4% de l'EB consommée), très peu de vaine pâture interne (5,6 – 11,2%), sans distribution d'aliments à l'auge. Les agriculteurs et les agro-éleveurs valorisent les parcours naturels, mais dans une proportion moindre (40,9 - 76% de l'EB consommée), avec d'avantage de vaine pâture interne (14,8 - 30,9%) et une distribution d'aliments à l'auge (7,2 à 30,4%).

La consommation d'ET par unité de bétail est plus faible chez les éleveurs que chez les autres producteurs. Elle reflète l'impact de la stabulation des animaux sur la mobilisation de la main d'œuvre. La conduite des animaux au pâturage leur permet de faire des économies d'échelle et de limiter le temps de travail investi par animal. Au contraire, la stabulation des animaux contraint les producteurs à investir du travail à travers l'apport de soins aux animaux (apport d'eau, d'aliments et d'hygiène à travers le nettoyage des enclos, etc.) et ce, proportionnellement à la taille du troupeau.

Les productions d'EB par UBT restent également équivalentes d'un type d'exploitations à l'autre, à quelques exceptions près. Les objectifs de production des exploitations et les ventes d'animaux de l'année du suivi influencent le niveau de production d'EB (0 à 2,4% de l'EB produite). En revanche, la production de déjections animales ne varie presque pas et suit la consommation d'EB. Elle représente la large majorité de la production d'EB issue de ces systèmes d'élevage (98 à 100% de l'EB produite).

Les troupeaux des éleveurs présentent de meilleures EEF (47 à 55 contre 7 à 26) et EET (251 à 377 contre 54 à 169). L'EEB des systèmes d'élevage est comparable dans l'ensemble des exploitations.

Tableau XIII. Profils énergétiques à l'échelle du système d'élevage

	E1	E4	E8	AE5	AE6	A2	A3	A7
Total EF consommée (MJ/UBT)	364	453	309	818	3 004	1 279	2 325	3 413
Carburant (%)	4%	9%	0%	20%	25%	11%	40%	71%
Concentré (%)	0,37%	10%	0%	3%	8%	0%	0%	0%
Fourrage (%)	0%	5%	0%	7%	3%	0%	2%	0%
Résidus en VP externe (%)	75%	62%	95%	23%	0%	80%	0%	0%
CMV (%)	6%	1%	0%	16%	24%	2%	24%	0%
Achat d'animaux (%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Frais vétérinaire (%)	9%	12%	4%	19%	38%	7%	31%	27%
Bâtiment (%)	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Matériel (%)	3%	1%	0%	12%	1%	0%	1%	2%
Travailleurs extérieurs (%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%
Part de EF totale consommée sur SE (%)	29%	27%	86%	9%	1%	9%	2%	1%
Total EB consommée (MJ/UBT)	38 305	38 948	37 594	40 260	42 071	39 754	41 382	48 211
Animaux achetés (%)	0,3%	0,0%	0,0%	0,1%	0,5%	0,8%	3,9%	0,8%
Pâturage extérieur (%)	91,4%	81,5%	94,4%	67,0%	53,0%	76,0%	56,5%	40,9%
Résidus en VP interne (%)	8,4%	11,2%	5,6%	25,7%	30,9%	14,8%	27,2%	27,8%
Fourrage distribué (%)	0,0%	7,3%	0,0%	7,2%	15,6%	8,5%	12,5%	30,4%
Total ET consommée (MJ/UBT)	54	72	65	125	169	232	501	242
Total EB produite (MJ/UBT)	20 089	21 279	16 432	21 089	20 925	16 857	25 493	15 800
Animaux produits (%)	2,0%	1,6%	0,0%	2,4%	0,0%	0,7%	1,7%	1,2%
Lait produits (%)	0,1%	0,24%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Effluent déposé en VP Interne (%)	21,1%	25,1%	24,1%	41,4%	24,8%	13,9%	19,9%	33,9%
Effluent stocké (%)	37,5%	39,4%	25,5%	27,8%	51,7%	44,5%	58,2%	37,3%
Effluent déposé à extérieur (%)	39,4%	33,7%	49,9%	28,4%	23,6%	40,9%	20,3%	27,6%
EEF ^{élevage}	55,42	46,97	53,17	25,83	7,03	13,41	11,65	4,74
EET ^{élevage}	377	297	251	169	125	74	54	67
EEB ^{élevage}	0,52	0,51	0,44	0,51	0,50	0,43	0,65	0,34

EF : énergie fossile ; EB : énergie brute ; ET : énergie du travail ; ES : énergie solaire ; EEF : efficacité énergie fossile ; EEB : efficacité énergie brute ; EET : efficacité énergie travail ; EES : efficacité énergie solaire ; SE : système d'élevage ; UBT : Unité Bovin Tropical ; FO : fumure organique ; RDC : résidu de culture ; CMV : Complexe minéraux et vitamines ; VP : Vaine pâture ; E : éleveur ; AE : agro-éleveur ; A : agriculteur.

3.2. Effet de l'intégration agriculture-élevage sur le fonctionnement énergétique des exploitations de polyculture-élevage

3.2.1. Effet de la traction animale sur le profil énergétique des exploitations

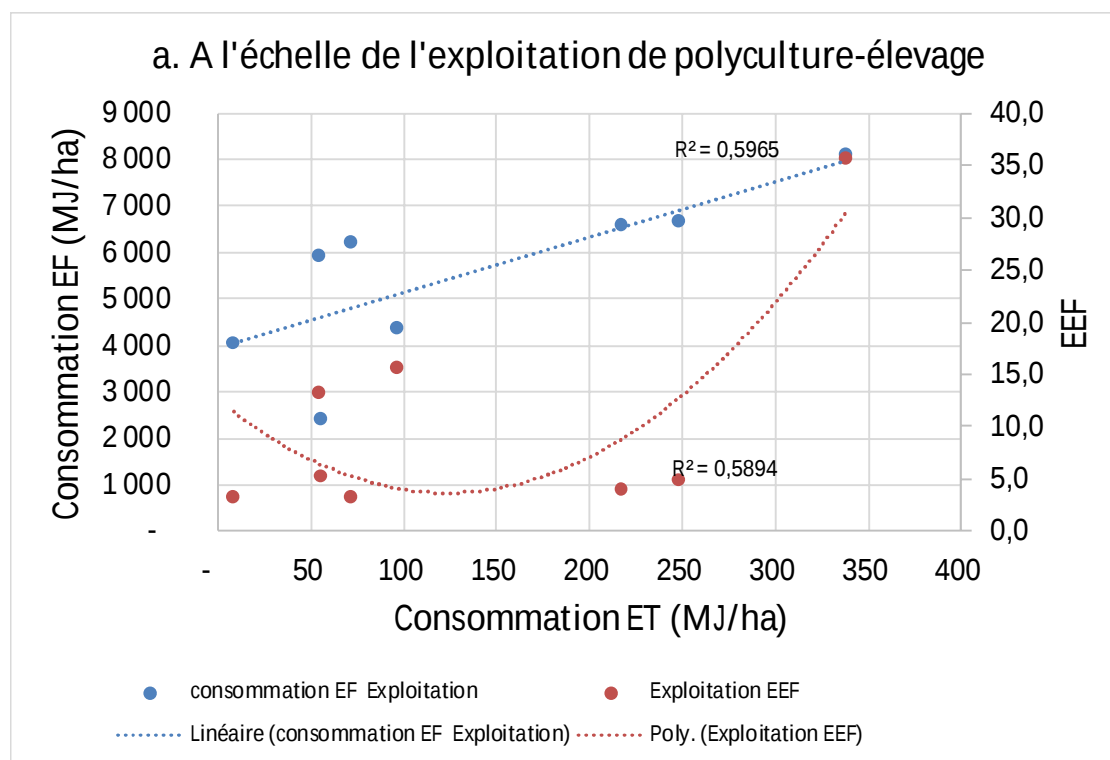
La traction animale et plus largement le travail humain et animal, contribuent à améliorer l'efficacité énergétique fossile des exploitations de polyculture-élevage étudiées à travers l'effet de la consommation d'ET sur la consommation d'EF et sur l'EEF elle-même (Figure 20).

A l'échelle des **exploitations de polyculture-élevage**, la consommation d'ET s'accompagne d'une augmentation de la consommation d'EF par unité de surface (r^2 0,60) et d'une amélioration de l'EEF de l'exploitation (r^2 0,59 ; Figure 20 a). En l'absence de mécanisation, ces exploitations s'appuient sur l'ET pour les activités agricoles et d'élevage. L'investissement

d'EF par unité de surface s'accompagne d'une mobilisation de main d'œuvre (entretien de la culture du coton, vidange des fosses, etc.), gage de productivité et d'une bonne EEF.

A l'échelle du **système de culture**, l'investissement en EF sur les cultures n'est pas lié à un investissement en travail (r^2 0,06 ; Figure 20 b). Les exploitations n'investissent pas toujours davantage de travail sur les systèmes de cultures ayant bénéficié d'EF. Les consommations d'ET et d'EF ne sont pas liées à une amélioration de l'EB. Les investissements en ET et EF ne suffisent pas à accroître significativement la production d'EB des systèmes de culture. D'autres investissements restent nécessaires.

A l'échelle du **système d'élevage**, les consommations d'EF, dues aux importations de fourrages et résidus distribués à l'auge lors de la stabulation s'accompagne d'une mobilisation forte de la main d'œuvre pour le soin des animaux (ramassage et transport des fourrages, affouragement, nettoyage des étables, etc.), augmentant la consommation d'ET (r^2 0,74 Figure 20 c), réduisant l'EEF.



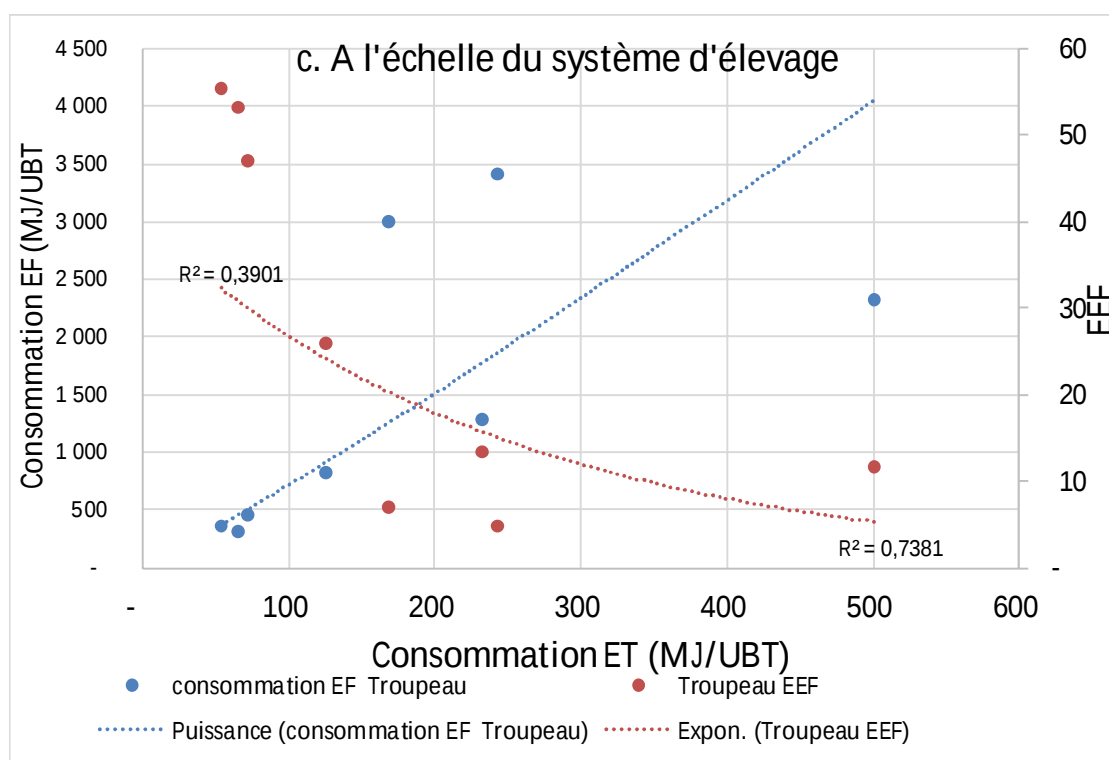
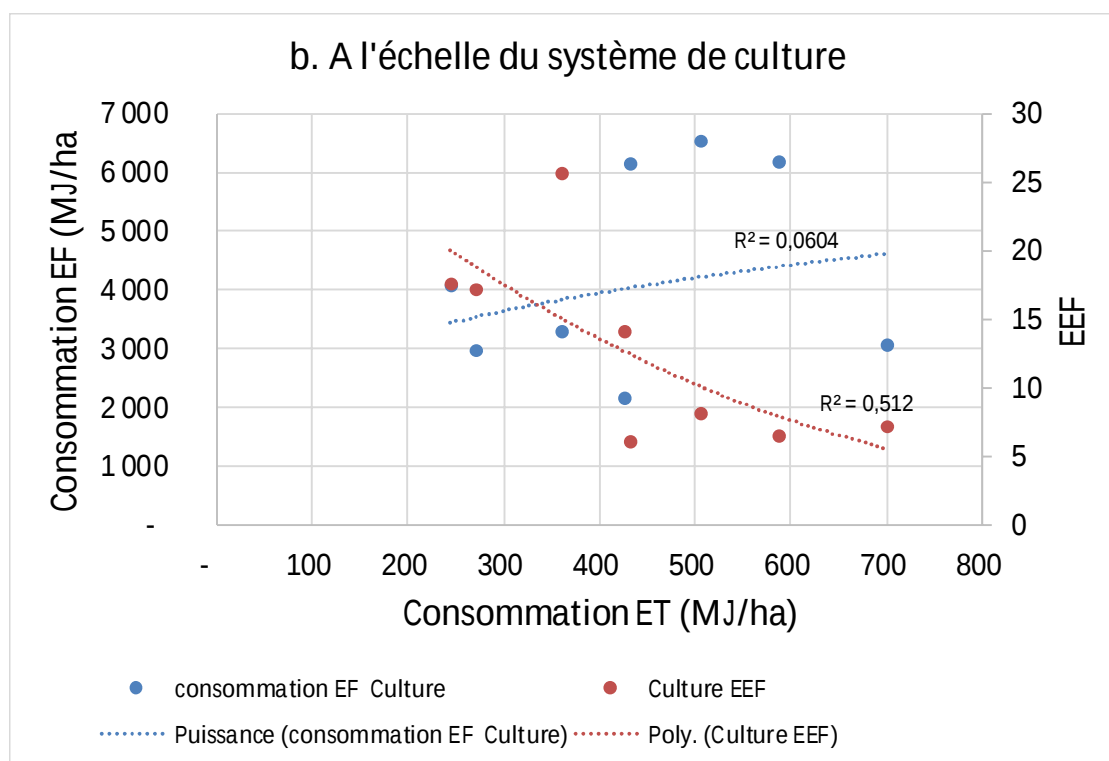


Figure 20. Consommation d'énergie du travail en fonction de la consommation d'énergie fossile et de l'efficacité énergétique à l'échelle de l'exploitation, du système de culture et d'élevage

3.2.2. Effet de la production de fumure organique et du stock fourrager sur le profil énergétique des exploitations

Pour les exploitations de polyculture-élevage étudiées, les indicateurs décrivant les pratiques de production de fumure organique et de stock fourrager ont été calculés et sont présentés dans le Tableau XIV.

Tableau XIV. Indicateurs d'intégration agriculture-élevage dans des exploitations de polyculture-élevage étudiées (Bénagabou et al., 2017)

	E1	E4	E8	AE5	AE6	A2	A3	A7
Couverture besoin fourrager (%)	3	6	0	9	14	8	16	41
Fourrage stocké par UBT (kg MS/UBT)	66	129	0	202	308	175	370	929
Fanes et culture fourragère (%)	37%	80%	0%	20%	11%	80%	12%	12%
Fourrage importé par ha (kg MS/ha)	13 245	14 200	42 246	2 703	897	2 848	1 218	597
Fourrage importé par UBT (kg MS/UBT)	1 826	1 663	1 683	1 510	1 278	1 515	1 339	1 130
Couverture besoin en FO (%)	50	42	56	32	16	24	29	9
FO épandue par ha (kg MS/ha)	1 250	1 062	1 393	812	401	600	731	227
FO épandue par UBT (kg MS/UBT)	174	124	58	454	570	321	813	429

ha : hectare ; UBT : unité bovin tropical ; MS : matière sèche ; FO : fumure organique ; E : éleveur ; AE : agro-leveur ; A : agriculteur

A l'échelle de l'exploitation, les consommations d'EB diminuent avec l'augmentation de la production de fumure organique par UBT (r^2 0,68) et l'augmentation de la couverture des besoins fourragers (r^2 0,55). Au contraire, la production de fumure organique par hectare est liée à une augmentation de la consommation d'EB par l'exploitation (r^2 0,59).

La production d'EB par l'exploitation s'améliore avec la production de fumure organique par hectare cultivé (r^2 0,54), mais est limitée par la production de fumure organique par unité de bétail (r^2 0,71) et par la couverture des besoins fourragers (r^2 0,66). Le dépôt de déjections animales sur les champs et les parcours est souvent le principal poste de production d'EB des exploitations. La collecte des déjections animales, l'affouragement et la stabulation limitent cette production.

Les efficacités énergétiques EEF et EEB des exploitations dépendent également des pratiques d'IAE mise en œuvre. L'EEF est améliorée par une production de fumure organique par hectare (r^2 0,83) et par unité de bétail (r^2 0,50). Par contre, la couverture des besoins fourragers est liée à une diminution forte de l'EEF (r^2 0,81). L'affouragement à l'auge réduisant la production d'EB globale. A l'inverse, les productions de fumure organique par hectare (r^2 0,52) et par unité de bétail (r^2 0,73) sont liées à une réduction de l'EEB alors que la couverture des besoins fourragers est liée à une augmentation de l'EEB (r^2 0,73).

A l'échelle du système de culture, la consommation d'EF par unité de surface est variable d'une exploitation à l'autre et elle diminue avec la production de fumure organique par hectare (r^2 0,49). Les exploitations qui utilisent de forte dose de fumure organique par hectare cultivé ont tendance à réduire leur investissement en EF. La consommation d'ET par unité de surface ne semble pas être liée aux pratiques de production de fumure organique et de stockage de

fourrage. Ces pratiques ne semblent pas impliquer une augmentation nécessaire du travail à investir sur le système de culture. Enfin, l'efficacité énergétique du système de culture EEF est améliorée par la production de fumure organique par hectare (r^2 0,58), alors que l'EEB est meilleure avec la production de fumure organique par UBT (r^2 0,60) et le stockage de fourrage (r^2 0,90).

A l'échelle du système d'élevage, la consommation d'EF par unité de bétail, due largement aux consommations de ressources pastorales augmente avec la couverture des besoins des animaux (r^2 0,63), et la production de fumure organique par UBT (r^2 0,73). Au contraire, la consommation d'EF par UBT diminue quand la production de fumure organique par hectare augmente (r^2 0,90). Une bonne production de fumure organique par hectare ne s'appuie pas uniquement sur une consommation de ressources pastorales par les animaux. La couverture des besoins des animaux et la production de fumure organique par UBT sont également liées à une forte consommation en ET (respectivement r^2 0,4 et 0,69), alors que la production de fumure par hectare est liée à une diminution de cette consommation (r^2 0,56). La production de fumure organique par hectare ne s'accompagne pas nécessairement d'un investissement en travail par unité de bétail mais également par une production passive, n'impliquant pas de travail (dépôt de fèces en vaine pâture ou parage direct). Enfin, les pratiques d'IAE décrites ne sont pas liées à une amélioration de la production d'EB par le système d'élevage.

Les consommations et les productions d'EB du système d'élevage sont très dépendantes entre elles respectant les principes de la digestion animale. L'EEB est donc toujours inférieure à 1, peu variable d'une exploitation à l'autre et non liée aux pratiques de production de fumure organique et de stock fourrager. En revanche, l'EEF est améliorée par la production de fumure organique par hectare (r^2 0,94) alors qu'elle diminue avec le stock fourrager (r^2 0,69) et la production de fumure organique par UBT (r^2 0,60).

4. DISCUSSION

4.1. IAE est-elle une forme d'intensification écologique des exploitations de polyculture-élevage ?

Bénagabou *et al.* (2017) proposent de distinguer deux formes d'IAE : (i) l'intégration agriculture-élevage active (IAE_A) impliquant un investissement en travail et une manipulation de biomasses (ramassage, transport de fourrage et de fumure organique), et (ii) l'intégration agriculture-élevage passive (IAE_P) s'appuyant sur la mobilité animale (parage direct des animaux et vaine pâture). L'IAE_A est liée à la couverture des besoins fourragers et à la production de fumure organique par UBT, alors que l'IAE_P est liée à la production de fumure

organique par hectare. Les résultats ont montré que les exploitations ne pratiquent pas toujours exclusivement l'une ou l'autre de ces formes, mais qu'il existe un gradient d'IAE entre ces deux formes d'IAE avec une zone de transition (IAE_{AP}) où les deux formes sont simultanément mises en œuvre.

Les résultats de cette étude révèlent que les pratiques d'IAE mises en œuvre déterminent le niveau de performance énergétique des exploitations étudiées. En reprenant la distinction de forme d'IAE proposée par Bénagabou *et al.* (2017), il apparaît que les pratiques d' IAE_P requièrent de fortes consommations d'EB par l'exploitation mais permettent une réduction de la consommation d'EF par le système de culture et une réduction de la consommation d'EF et d'ET par le système d'élevage. La production d'EB de l'exploitation est améliorée par l' IAE_P sans que cette amélioration ne se fasse à l'échelle du système de culture. Les apports de fumure organique sur le système de culture ne sont pas accompagnés d'un investissement en EF, qui permettrait pourtant de soutenir la production agricole. De plus, l'EB produite n'est pas uniquement composée de biomasses nobles (coton, grains) mais aussi de déjections animales déposées sur les parcours. L' IAE_P améliore ainsi l'EEF et l'EET des exploitations mais réduit à cette échelle l'EEB. Cette étude complète celle de Bénagabou *et al.* (2013) qui imputaient l'amélioration de l'EEF à la seule réduction de consommation d'EF. Cette étude montre que derrière une bonne EEF se cache une forte dépendance en EB, comme le montrent (Bénagabou *et al.*, 2017) qui estiment que les exploitations qui pratiquent l' IAE_P sont dépendants à 78% de l'extérieur pour l'EB.

Les pratiques d' IAE_A participent à limiter les consommations d'EB par l'exploitation. Cependant, ces pratiques ne participent pas à une augmentation des productions d'EB de l'exploitation. En recyclant les résidus de culture et les déjections animales produits par le système, ils ne contribuent plus à la production globale. Les pratiques d' IAE_A conduisent à un investissement en EF et ET par le système d'élevage. Elles impliquent en effet un fort investissement en intrants et en travail avec les soins à accorder aux animaux stabulés (ramassage et stockage des fourrages, nettoyage des étables etc.). Dans les exploitations étudiées, ces investissements ne s'accompagnent pas d'une augmentation de la production en EB par le système d'élevage. Même si les pratiques mises en œuvre illustrent des efforts d'investissement pour l'alimentation des animaux, la couverture des besoins des animaux reste insuffisante pour permettre une amélioration de la productivité animale. Ainsi, la couverture des besoins fourragers améliore l'EEB de l'exploitation, alors que la production de fumure organique améliore l'EEF.

En se référant au concept d'intensification écologique (Cassman, 1999 ; Griffon, 2013) qui viserait « à concevoir des systèmes de production plus productifs, plus efficaces, moins exposés aux risques et moins nocifs pour l'environnement » (Vall *et al.*, 2011), l'efficacité des

systèmes de production est bien au cœur des objectifs de l'intensification écologique. Les pratiques d'IAE participent donc à l'intensification écologique des systèmes de production.

L'EB disponible étant limitante dans la zone d'étude, les pratiques d'IAE_P, consommatrices d'EB, ne pourraient être l'unique modèle de développement des exploitations de polyculture-élevage pour une agriculture durable. La forte pression foncière, l'extension des superficies cultivées et la réduction des terres de parcours sont des contraintes au développement de l'IAE_P et un frein pour les systèmes d'élevage extensifs (Vall et Diallo, 2009).

L'EF et l'EB sont les deux formes d'énergies limitantes des systèmes étudiés alors que l'ES et l'ET semblent être moins contraignantes, cela du fait de la disponibilité du rayonnement solaire dans la zone, et encore actuellement, de la main d'œuvre et des animaux de traction. Il est donc intéressant d'évaluer la performance des systèmes en tenant compte des facteurs pouvant compromettre leur fonctionnement.

L'intensification par les intrants a longtemps été reconnue comme la forme d'intensification pour assurer une productivité élevée des systèmes de production (Pieri, 1989), même si la nécessité de préserver l'environnement et les ressources naturelles milite pour une intensification écologique (Cassman, 1999 ; Griffon, 2013). Les consommations d'EF par hectare cultivé sont plus faibles dans les systèmes de polyculture-élevage étudiés en comparaison aux systèmes intensifs européens, américains ou asiatiques où les quantités d'EF par hectare peuvent être 5 fois plus importantes (Vigne, 2012). Les systèmes à bas niveau d'intrants étudiés demeurent plus intensifs que les systèmes de productions laitiers au Sud-Mali (Vigne, 2012) où le coton, consommateur d'EF par hectare occupe une faible part de l'assolement. Les faibles revenus des exploitations ne sont pas le seul frein à l'usage des intrants car la filière cotonnière met à disposition des cotonculteurs des intrants à crédit. Pourtant, en dehors de cette filière, l'usage des intrants reste limité par les faibles capacités d'investissement des exploitations et l'insuffisance des subventions de l'Etat.

Les systèmes intensifs européens, américains, ou asiatiques sont consommateurs d'EF par hectare mais sont relativement autonomes en EB grâce à une production fourragère développée (Vigne, 2012). Nos résultats montrent que dans ces systèmes à bas niveau d'intrants et à faible productivité, l'intensification à base d'intrants doit nécessairement s'accompagner d'un investissement minimum en EB pour soutenir la productivité du système. Ainsi un apport suffisant de fumure organique améliorerait la productivité agricole des sols en soutenant les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Bationo *et al.*, 2007 ; Coulibaly *et al.*, 2012b ; Feller, 1995).

Il est communément admis que dans les systèmes intensifs européens, américains, ou asiatiques, l'intensification s'accompagne d'une amélioration des productions et de la

productivité du travail, réduisant les besoins en travail, remplacés par la motorisation (Dufumier, 2002). Dans les systèmes étudiés, la faible place de la motorisation ne permet pas encore d'appréhender ce changement de forme d'énergie mobilisée accompagnant l'intensification. Le recours à l'ET humain et animal y reste au centre avec une motorisation absente, et une mécanisation limitée à quelques activités agricoles (labour, buttage et sarclage) et le transport (D'Aquino *et al.*, 1995 ; Havard et Side, 2016). Au contraire, dans cette étude il apparaît que la culture du coton et les pratiques d'IAE_A s'accompagnent d'un accroissement de la charge en travail des exploitations avec l'apparition de nouvelles activités (ramassage, stockage et distribution de fourrage, nettoyage des étables, production de FO) (Landais et Lhoste, 1990).

Pour améliorer la productivité de ces systèmes, à un coût énergétique raisonnable, il apparaît donc nécessaire de lever le frein principal qui est la faible disponibilité de l'EB, véritable ressource limitante de la productivité des systèmes étudiés. Les interventions devraient donc porter sur la recherche de compromis d'usage des biomasses entre production de fumure et l'affouragement des animaux (Tittonell *et al.*, 2012 ; Masse *et al.*, 2015 ; Nana *et al.*, 2015), mais aussi sur la productivité des zones de parcours (Achard *et al.*, 2001), et l'amélioration du niveau de production d'EB dans les exploitations avec l'amélioration de l'autonomie fourragère. Elle pourrait se faire à travers deux approches : (i) une production fourragère par le recours de fourrages à haut-rendement (Coulibaly *et al.*, 2012c), cultures à multi-objectifs (fertilité, fourrage, alimentaire, etc.) (Coulibaly *et al.*, 2012c), et l'implantation de fourrage ligneux (Sib *et al.*, 2018); et (ii) l'accompagnement des éleveurs vers des projets d'élevage raisonnés et plus productifs (Koutou *et al.*, 2016 ; Delma *et al.*, 2016) permettant une amélioration des revenus et une stabulation des animaux, favorable à l'adoption des pratiques d'IAE.

Des marges de manœuvres existent également pour améliorer la couverture des besoins en FO dans les exploitations pratiquant une IAE (Coulibaly *et al.*, 2012a ; Semporé, 2013 ; Blanchard *et al.*, 2014 ; Diarisso *et al.*, 2015). Un meilleur taux de transformation des biomasses en FO paraît nécessaire, en parallèle d'une augmentation de la production de biomasse. La transformation des résidus de culture directement au champ dans des fosses à compost, sans digestion par l'animal permet d'augmenter le volume de FO produit et de transformer des biomasses autrement peu valorisées comme les tiges de coton (Berger *et al.*, 1987 ; Blanchard *et al.*, 2013) au lieu de brûler suivant les pratiques actuelles (Vall *et al.*, 2010). Pour limiter l'augmentation du travail lié à la mise en place de production de FO, les paysans du Mali Sud ont développé des pratiques de production de FO à moindre investissement en travail sans retournement nécessaire et sans arrosage, en valorisant les eaux de pluies et en produisant en 2 ans (Bosma *et al.*, 1993 ; Vall *et al.*, 2011 ; Blanchard *et al.*, 2013).

4.2. Atouts et limites de la méthode pluri-énergie utilisée

Quelques limites à la méthode pluri-énergie peuvent être soulignées. Certaines avaient été soulevées par Vigne (2012) dans son travail initial mobilisant cette méthode, d'autres apparaissent dans cette étude.

Il semble nécessaire de faire des ***ajustements méthodologiques par une prise en compte des énergies indirectement consommées nécessaires pour la production des intrants***.

Actuellement, la comptabilisation des énergies indirectes consommées pour la production des intrants concerne uniquement l'EF. L'ES et de l'ET indirectement consommées ne sont pas prises en compte. Pourtant, dans les systèmes étudiés, la biomasse consommée par les animaux lors de la vaine pâture correspond indirectement à une consommation d'ES et d'ET nécessaire à la production des RDC ingérés. La prise en compte des consommations indirectes d'ES et d'ET à l'échelle des exploitations, au-delà du système de culture seul, permettrait de mieux rendre compte des inégales consommations d'énergies observées selon les formes d'IAE pratiquées par les exploitations. Les exploitations pratiquant l'IAE_P consomment largement des RDC impliquant une consommation indirecte d'ES et d'ET forte, sans mobilisation directe d'ET. Au contraire, les exploitations qui pratiquent l'IAE_A consomment davantage de fourrages et RDC issus de l'exploitation, impliquant une consommation indirecte d'ES et d'ET plus limitée, mais impliquant une mobilisation directe d'ES, et d'ET. La prise en compte de ces consommations indirectes d'ES et d'ET permettrait de préciser l'analyse des flux d'énergies dans ces systèmes et l'allocation des ressources circulant entre compartiments. Elles paraissent particulièrement pertinentes pour l'analyse des pratiques d'IAE.

Une deuxième limite de la méthode est ***sa vision encore très restrictive de l'impact environnemental des systèmes étudiés***. Si l'impact de la consommation d'EF est maintenant clairement défini à travers son lien avec les émissions de GES, cela ne l'est pas pour les autres formes d'énergies. L'impact de l'ES et l'EB prélevées sous forme de fourrage sur les pâturages et valorisées par les animaux sous forme d'EB consommable et d'ET pourrait être positif sauf si cette consommation excède la capacité de régénération de la ressource en cas de surpâturage (Masse *et al.*, 2015). Enfin, la mobilisation d'ET fait référence à la charge en travail des travailleurs et animaux. S'il existe un optimum d'effort musculaire à réaliser au-delà duquel le travail devient dommageable à la santé des travailleurs, l'ET fait également référence à l'emploi. Le recours à l'ET illustre le fait que les systèmes s'appuient sur le travail de travailleurs, pouvant ainsi participer à la création d'emploi, à la différence des systèmes ultra mécanisés où le travail humain n'a quasi plus sa place (Blanc et Perrier-Cornet, 1999).

La flexibilité et la généricité de cette méthode et la prise en compte de plusieurs formes d'énergies, sont des atouts considérables permis par l'ouverture de la boîte « *noire* », de l'exploitation, pour y **étudier les flux d'énergies entrants, traversants et sortants**. Toutefois, d'autres méthodes construites sur la même approche sont complémentaires en permettant de représenter ces systèmes en réseau de flux et d'analyser les performances propres de ces réseaux (recyclage, autonomie, etc) utilise pour l'analyse de l'IAE dans les exploitations. Bénagabou *et al.* (2017) dans leur étude des réseaux d'énergie brute de ces exploitations de polyculture-élevage montrent que les pratiques d'IAE sont impliquées dans 67% de l'EB circulant dans l'exploitation.

L'analyse énergétique à l'échelle de l'exploitation permet la caractérisation de l'état énergétique global, lors d'études holistiques, ou de l'intégration des activités, l'autonomie ou le recyclage dans le système (Rufino *et al.*, 2009a ; Stark, 2016 ; Bénagabou *et al.*, 2017). Le détail à l'échelle des composantes productives permet d'identifier des compromis dans l'utilisation des différentes formes d'énergies et leurs impacts sur la productivité des systèmes de production. Vu l'importance de l'autoconsommation dans ces systèmes familiaux et du rôle central de la famille dans le travail fourni (ET), il serait intéressant d'élargir l'analyse du **fonctionnement énergétique à la composante « famille »** pour comprendre le rôle de l'alimentation humaine et du travail dans le fonctionnement énergétique global de ces systèmes.

Enfin, la méthode pluri-énergie nécessite une quantité de données importantes pour décrire le fonctionnement énergétique des exploitations de polyculture-élevage. Pour faire face à cette nécessité, cette étude a été réalisée sur un échantillon limité de huit exploitations représentatives de la diversité des exploitations de la zone, et mettant en œuvre un large panel de pratiques d'IAE (Vall *et al.*, 2006a). Ce choix raisonné s'appuie sur les connaissances de la structure et du fonctionnement des exploitations (Blanchard, 2005 ; Andrieu *et al.*, 2009 ; Vall *et al.*, 2011 ; Coulibaly *et al.*, 2012a ; Sempore *et al.*, 2015 ; Bénagabou, 2011 ; Bénagabou *et al.*, 2013). Une enquête préalable des exploitations a enfin permis de reconnaître la diversité des pratiques mises en œuvre afin de préciser l'échantillonnage (Ferraton et Touzard, 2009) et rendre possible une extrapolation des résultats à un ensemble plus large d'exploitations.

5. CONCLUSION

L'analyse pluri-énergie a permis l'analyse du fonctionnement énergétique des exploitations de polyculture-élevage mettant en œuvre des pratiques d'IAE. Elle a permis de cerner l'existence de différents profils énergétiques selon la structure des exploitations, leurs stratégies de production et leurs pratiques d'intégration agriculture-élevage. Elle a surtout permis de

comprendre le rôle des pratiques d'IAE dans la mobilisation des différentes formes d'énergies. Les résultats ont montré que la traction animale est favorable à une meilleure EEF, rappelant la place centrale du travail humain et animal dans ces systèmes. La production de fumure organique par hectare (IAE_P) requiert une mobilisation d'EB très forte (pâturage et vaine pâture), permet une réduction des investissements en EF et ET pour une production d'EB améliorée par la production de déjections animales sur les parcours. Elle est favorable à une bonne EEF. La production de fumure organique par UBT et le stockage de fourrage par UBT (IAE_A) requièrent des investissements en EF et en ET mais sont favorables à une bonne EEB. Les pratiques d'IAE contribuent à accroître la charge en travail (ET). Toutefois, il reste des marges de manœuvre pour améliorer les pratiques d'IAE mises en œuvre dans les exploitations de polyculture-élevage de la zone, ce qui représente une opportunité pour améliorer l'EEF et l'EEB ; participant au développement d'une agriculture durable. L'amélioration de la production d'EB dans les exploitations de polyculture-élevage nécessite donc un investissement minimum en EB, en EF et en ET. L'intensification par les intrants (EF) doit s'accompagner d'un investissement en travail (ET) pour l'entretien des cultures, des animaux et la production de fumure et d'une augmentation des consommations en EB sous forme de résidus et de fumure organique.

CHAPITRE VI. DISCUSSION GENERALE

1. Retour critique sur la multiplicité des méthodes et approches adoptées

1.1. Approche par étude de cas : échantillon et choix des exploitations étudiées représentatives de la diversité

Une approche par étude de cas nécessite une connaissance fine de la diversité des cas présents dans le milieu étudié, pour choisir les cas représentatifs sur lesquels on compte approfondir les connaissances. Des études préalables des systèmes agricoles réalisées dans la commune étudiée, sur des thématiques très diverses, ont permis de disposer de connaissances sur la diversité et le fonctionnement des exploitations de polyculture-élevage (Blanchard, 2005 ; Vall *et al.*, 2006a ; 2011 ; Coulibaly, 2012), et les modes de conduite des troupeaux au pâturage et des pratiques d'alimentation (Vall et Diallo, 2009), des modalités de la gouvernance territoriale pour la gestion des ressources naturelles (Diallo *et al.*, 2011). L'ensemble de ces études nous ont fourni une bonne connaissance de la diversité des systèmes de production et des pratiques d'IAE dans la zone d'étude pour choisir des exploitations de polyculture-élevage représentatives de la diversité des situations.

L'approche par étude de cas a été longtemps dénigrée par une partie de la communauté scientifique qui ne voyait pas l'intérêt d'étudier des cas « isolés » et interdisait d'extrapoler les résultats obtenus à un ensemble plus grand. Elle permet pourtant d'analyser en profondeur des phénomènes dans leur contexte et d'extrapoler les résultats à condition d'établir la pertinence scientifique de la méthode d'étude, de s'assurer de la fiabilité et de la validité des résultats, de bien préparer l'étude et de sélectionner les bons cas, de collecter, traiter et interpréter les données et diffuser les résultats. Cette approche développée par Gagnon (2012), qui propose un guide méthodologique, a été adoptée par divers travaux de thèse dans la même zone (Diarisso, 2015 ; Semporé, 2015).

L'approche par étude de cas nécessite une charge importante en temps de travail pour le chercheur et le sujet étudié (Gagnon, 2012). Il est alors nécessaire d'ajuster la taille de l'échantillon au besoin de connaissance et au temps imparti. Dans cette étude, le nombre restreint d'exploitations de polyculture-élevage étudiées se justifie par la quantité de données importantes à collecter pour étudier l'ensemble des flux d'énergies, et la diversité des pratiques mises en œuvre tout en permettant la réalisation des enquêtes et des suivis de flux dans les exploitations dans le temps imparti pour la thèse.

Cette étude basée sur des cas nous a permis de concevoir des outils de collecte de données qualitatives et quantitatives, permettant une étude approfondie des pratiques d'intégration

agriculture-élevage et de la consommation et production des différentes formes d'énergies dans des exploitations représentant la diversité des exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso. La collecte des données dans cette étude de cas a été menée en deux phases : les enquêtes déclaratives des chefs d'exploitations permettant de reconstruire les flux d'énergies au cours d'une année puis le suivi mensuel de l'ensemble de ces flux, en temps réel. Les enquêtes initiales visaient à identifier les données nécessaires à collecter lors du suivi des flux dans les exploitations pour développer les différentes approches mobilisées dans cette étude (méthode planète savane, ENA, analyse pluri-énergie). Ces enquêtes ont également permis de préciser la fréquence de passages pour le suivi, de confirmer la taille de l'échantillon (bonne prise en compte de la diversité de structure et de fonctionnement des exploitations de la zone) et de catégoriser les flux à suivre en trois groupes : les flux mesurables, les flux à estimer et les flux à calculer.

1.2. Méthodes et approches utilisées : complémentarité, équivalence ou plus-value ?

Quatre approches ont été utilisées et sont deux à deux complémentaires. Les deux premières sont utilisées pour caractériser le fonctionnement énergétique des exploitations de polyculture-élevage (la méthode PLANETE Savane et l'analyse pluri-énergie) et deux autres pour caractériser le niveau de pratique de l'IAE et le fonctionnement écologique des exploitations agricoles étudiées (analyse des pratiques d'IAE et l'analyse des réseaux écologiques).

La méthode PLANETE Savane s'appuie sur la méthode PLANETE (Ferriere, 1997 ; Bochu, 2002) qui prend en compte l'énergie fossile consommée et l'énergie brute produite par des exploitations intensives et commerciales. La méthode PLANETE a été adaptée aux cas spécifiques des exploitations des savanes d'Afrique de l'Ouest, avec un ajustement des coefficients énergétiques et des flux pris en compte (Bénagabou, 2011 ; Vigne *et al.*, 2014). Elle se limite donc aux flux d'énergie fossile entrants et aux flux d'énergie brute sortants des exploitations étudiées et permet une analyse succincte et partielle du fonctionnement énergétique des exploitations. Cette méthode qui considère l'exploitation comme une « boîte noire », nécessite relativement peu de données d'entrées pour être implémentée (consommation des intrants, carburants, et du travail et productions). Elle offre rapidement une image du profil énergétique et de l'efficacité énergétique fossile des exploitations. Cependant, cette méthode ne permet pas de prendre en compte les flux internes au système avec l'autoconsommation, qui caractérise pourtant les systèmes étudiés (Brossier, 1987 ; Gafsi, 2007 ; Berti et Lebailly, 2009) et les pratiques d'IAE au cœur de cette étude. Cette méthode ne prend pas en compte également l'énergie du travail pourtant central dans les systèmes étudiés. Les insuffisances de cette méthode ont conduit à compléter l'étude en utilisant la méthode d'analyse pluri-énergie.

La méthode d'analyse pluri-énergie, est une méthode qui prend en compte quatre types d'énergie : consommation d'énergie fossile, brute, du travail et de l'énergie solaire et la production d'énergie brute (Vigne *et al.*, 2013). Cette méthode permet de mieux refléter le fonctionnement des exploitations de polyculture-élevage, avec la prise en compte des différentes formes d'énergies mobilisées. La traction animale étant un moteur de l'IAE (Lhoste, 1987 ; Chia, 2004), la prise en compte de l'énergie du travail dans cette étude est nécessaire. L'énergie solaire et brute sont deux formes d'énergies consommées par les systèmes de production agricole et d'élevage donc incontournables pour cette étude.

L'analyse pluri-énergie a aussi rendue possible l'analyse à l'échelle des composantes productives des systèmes étudiés (système de culture et système d'élevage), ouvrant la « boîte noire ». Elle est donc complémentaire de la méthode Planète Savane.

La méthode d'analyse des pratiques d'IAE tient compte des trois piliers biotechniques de l'IAE (Landais et Lhoste, 1993 ; Lhoste, 2004b) en calculant des indicateurs qui permettent d'estimer le respect des recommandations techniques pour la fertilisation organique des sols (Berger *et al.*, 1987), la couverture des besoins fourragers des animaux (Boudet, 1984 ; Boudet et Rivière, 1968 ; Mémento Agronome, 1991) et les besoins en traction animale au regard de la surface cultivée (Lhoste *et al.*, 2010). Cette approche relativement simple, nécessite peu de données qui sont relativement faciles à collecter. Certains indicateurs ont été proposés pour estimer globalement le niveau d'IAE à l'échelle des exploitations de polyculture-élevage en intégrant les trois piliers présentés plus haut (Bénagabou *et al.*, 2013). Cette méthode facilement applicable permet, d'identifier rapidement le niveau d'IAE d'une exploitation et d'identifier les piliers de l'IAE sur lesquels des marges de manœuvre existent .

Cependant, cette analyse s'attache aux résultats des pratiques (couverture des différents besoins) et non pas aux modalités de la pratique. Elle ne permet donc pas d'illustrer la diversité des pratiques mises en œuvre pour atteindre ces niveaux de couverture des besoins. Par exemple, un même taux de couverture des besoins de fertilisation organique des sols peut être atteint par la collecte et la transformation des résidus de culture et des déjections animales de l'exploitation ou à l'opposé le parcage direct dans les champs du troupeau. Cette méthode d'analyse reste donc insuffisante pour analyser la diversité de flux de matière entre les systèmes de culture et d'élevage.

La méthode d'analyse des réseaux écologiques est une méthode qui permet d'évaluer le niveau d'intégration des différentes composantes d'un même système et de déterminer le niveau de recyclage global de la matière dans le système (Finn, 1980). Cette méthode est utilisée sur les systèmes agricoles pour évaluer le niveau de recyclage et d'intégration des différentes activités de l'exploitation (Rufino *et al.*, 2009a). Cette méthode indique le rôle des

activités de la ferme dans le recyclage, au-delà de la mise en œuvre de l'IAE en analysant l'ensemble des flux internes, entrants et sortants du réseau (Bénagabou *et al.*, 2015 ; Stark *et al.*, 2016). La notion de recyclage est plus complexe que les échanges inter-compartiments. Elle évalue le nombre de fois qu'un élément passe à travers les compartiments du système (Fath et Patten, 1999a ; Finn, 1980). Cette méthode permet également d'évaluer l'autonomie du système étudié. Cette méthode nécessite par contre un grand nombre de données décrivant la taille de l'ensemble des flux entrants, traversants et sortants d'une exploitation. Elle est difficilement applicable à un échantillon large. L'analyse des réseaux est complémentaire à l'analyse des pratiques d'IAE en offrant une vision globale de l'intégration des différentes activités des exploitations de polyculture-élevage.

2. Intégration agriculture-élevage et performances des exploitations de polyculture-élevage

2.1. Diversité de formes d'IAE et stratégies adoptées des exploitations de polyculture-élevage

L'analyse des pratiques d'IAE a permis de révéler des liens entre les caractéristiques structurelles des exploitations et leurs pratiques d'IAE

Les caractéristiques structurelles sont reliées à un potentiel de mise en œuvre de l'IAE (Lemaire, 2014 ; Masse *et al.*, 2015 ; Ryschawy *et al.*, 2017). Le chargement animal (CA) calculé à l'échelle de l'exploitation, est un bon indicateur de la forme d'IAE potentielle d'une exploitation. Ainsi l'IAE active (IAE_A) serait davantage mise en œuvre par les exploitations ayant un chargement animal faible (CA<1) alors que celles ayant un chargement animal élevé (CA>7) s'orienteraient préférentiellement vers une IAE_P. Cette prédisposition n'est pas strictement exclusive et il reste une possibilité de conduite simultanée des pratiques d'IAE actives et passives par une même exploitation. En effet, malgré leurs efforts, les niveaux de stockage de fourrage et de production de fumure organique en fosse restent limités, les exploitations mobilisent également la vaine pâture après les récoltes et le dépôt de déjections animales pour fertiliser les champs. D'une exploitation à l'autre, une forme d'IAE émerge. Les exploitations qui pratiquent une IAE dite passive (IAE_P) s'appuient sur les ressources du milieu extérieur pour l'affouragement de leurs animaux (valorisation des pâturages et champs extérieurs). Celles pratiquant une IAE dite active (IAE_A) alimentent les troupeaux à partir des ressources propres sous forme de fourrages stockés (taux de couverture des besoins fourragers pouvant atteindre 41%). Les exploitations pratiquant une IAE intermédiaire (IAE_{AP}) présentent un fonctionnement intermédiaire.

D'après Dugué *et al.* (2004), l'évolution des relations agriculture-élevage requiert une articulation des échelles d'analyse et d'intervention dans un cadre d'analyse intégrant les dimensions biotechniques et socioéconomiques des synergies agriculture-élevage à toutes les échelles (exploitation, territoire). La caractérisation des formes d'IAE proposée dans cette étude intègre les recommandations proposées par (Dugué *et al.* (2004) en prenant en compte l'exploitation et son intégration au territoire vu comme un ensemble où s'échange des biens et intrants (marché), des biomasses (champs extérieurs et parcours) et du travail (main d'œuvre et traction). La Commune de Koumbia continue d'offrir la possibilité de conduite des animaux au pâturage bien que la pression foncière soit forte (Vall et Diallo, 2009). Les exploitations pratiquant l'IAE_A sont celles qui intègrent le plus à l'échelle de l'exploitation (Dugué *et al.*, 2013 ; Malam *et al.*, 2016) alors que celles qui pratiquent l'IAE_P et IAE_{AP} intègrent davantage à l'échelle du territoire (Dongmo, 2009 ; Diarisso *et al.*, 2015 ; Ryschawy *et al.*, 2017). Cependant le potentiel d'IAE d'une exploitation oriente le choix des formes d'IAE possibles mais ne fixe pas totalement les stratégies adoptées par les paysans, laissant une certaine flexibilité et permettant la mise en œuvre simultanée des pratiques d'IAE active et passive.

La compréhension des stratégies spécifiques adoptées par les exploitations passe par une analyse du fonctionnement ou des pratiques de l'exploitation. Cette compréhension permet de mettre en exergue les modalités de la mise en œuvre des pratiques, les performances qui y sont associées, et en comparant ces performances entre elles et avec des références préalables, cette analyse permet d'aboutir à l'élaboration de propositions d'amélioration des pratiques.

A la diversité des pratiques d'IAE à l'échelle des exploitations, est associée une diversité de flux de biomasse. Le stockage et l'affouragement des animaux se compose principalement par des pailles de céréales (0 - 98%) et un peu de foin fauché, légumineuses, et cultures fourragères comme le mucuna et le poids d'angole (0 - 37%). Cela confirme la description des pratiques d'affouragement réalisées précédemment (Vall *et al.*, 2011 ; Delma *et al.*, 2016). La production de fumure organique s'appuie sur une diversité de pratique (biodigesteur (0 - 15%), fosse fumièrre et fosse à compost au champs (0 - 100%), parcage direct (0 - 100%) reprenant l'étude des pratiques de production de fumure organique menée dans la zone d'étude (Blanchard *et al.*, 2017 ; Tinguéri *et al.*, 2017).

Malgré cette diversité de pratiques, les recommandations ne sont pas satisfaites. Sur l'ensemble des exploitations étudiées, le stockage de fourrage permet de couvrir seulement 0 à 41% des besoins fourragers annuels. Le recours aux ressources pastorales reste central pour l'alimentation des troupeaux. Les exploitations pratiquant l'IAE_P ont une couverture des besoins fourragers très faible. La production interne de fourrage est insuffisante pour satisfaire les besoins des animaux (Diarisso, 2015 ; Delma, 2016 ; Bénagabou *et al.*, 2017). De même,

les agriculteurs ont une faible couverture des besoins en fumure organique des sols (9 – 56%) faute d'un nombre suffisant d'animaux pour transformer les déjections et les résidus de cultures en fumure organique (Blanchard *et al.*, 2017 ; Tingueri *et al.*, 2017 ; Vall *et al.*, 2011). Chez les agriculteurs et quelques agro-éleveurs, l'observation d'une meilleure couverture des besoins fourragers s'inscrit dans une logique d'intensification des productions animales (atelier laitier ou d'embouche) et s'accompagne par un début de stabulation des animaux, prémisses d'une IAE_A (Powell *et al.*, 2004). Cette évolution est favorisée par le contexte avec un renforcement de la pression foncière, une réduction des espaces et des ressources disponibles sur les pâturages, des difficultés de mobilité des animaux, et le développement de la demande en produits animaux (Dugué *et al.*, 2004). Les systèmes d'élevage extensifs continueront d'exister tant que l'environnement continuera de fournir des potentialités pour assurer la mobilité du troupeau (Vall et Diallo, 2009). Cette forme d'élevage valorise des espaces et des ressources autrement peu valorisés, permettant de produire à faible coût (Dugué *et al.*, 2004). Plusieurs propriétaires de grands troupeaux ont comme stratégie de réduire les effectifs de leur troupeau pour être en adéquation avec l'offre fourragère du territoire. Les systèmes sont donc en train d'évoluer ; les acteurs ayant besoin d'accompagnement pour favoriser ces changements (culture fourragère, organisation des éleveurs, production de fumure organique (Dongmo, 2009 ; Semporé, 2015 ; Koutou *et al.*, 2016).

2.2. Intégration agriculture-élevage et performances énergétiques des exploitations de polyculture-élevage

L'étude des exploitations de polyculture-élevage vue comme des **réseaux de flux d'énergie brute** (Bénagabou *et al.*, 2017) montre que les pratiques d'IAE ne sont pas uniquement liées au recyclage des biomasses sur l'exploitation mais aussi à leurs transferts depuis l'extérieur grâce à la mobilité animale. Plusieurs auteurs comme (Dugué, 2002 ; Autfray *et al.*, 2012) avaient mis en évidence ce phénomène au Nord du Cameroun et au sud du Mali. Selon notre étude, l'autonomie et le recyclage ne sont pas liés. La dépendance du réseau à l'extérieur n'est pas une entrave au recyclage au sein du système. Le recyclage, complexe, n'est pas déterminé uniquement par les pratiques d'IAE, les importations ou les exportations mais elle est la résultante de tous ces facteurs à la fois ainsi que des stratégies de gestion des biomasses : pratique de production de FO (parcage direct, parc à bétail, production en fosses, etc.) et stockage de fourrage (achat, production de fourrage). Les pratiques d'IAE sont donc un sous ensemble du réseau qui participe au recyclage global des biomasses dans le réseau que constitue l'exploitation de polyculture-élevage (culture, élevage, famille, grenier, fosse, hangar.

De faibles niveaux de recyclage de l'énergie brute sont observés dans les écosystèmes, (systèmes fermés) dus à la respiration des plantes et des animaux (Finn, 1980). Le recyclage dans les agroécosystèmes est lui limité par l'exportation des productions (Alvarez *et al.*, 2014 ; Ferraton et Touzard, 2009 ; Rufino *et al.*, 2009a). Dès lors, le niveau de recyclage des nutriments dans les agroécosystèmes est plus faible que celui des écosystèmes (Rufino *et al.*, 2009a ; Alvarez *et al.*, 2014). D'autres facteurs réduisent le niveau de recyclage de l'énergie brute dans les agroécosystèmes. L'autoconsommation des produits agricoles par la famille et l'exportation des fèces humaines contribuent à réduire le recyclage dans les agroécosystèmes où la famille est incluse.

Les pratiques d'IAE sont liées à l'autonomie, et l'intensité de recyclage (PL) de l'énergie brute dans l'exploitation, ainsi qu'à la diversité et la complexité des liens (Li/n) dans le réseau de flux qu'elles représentent. Les pratiques d'IAE actives (IAE_A) requièrent de faibles importations d'énergies mais permettent d'accroître l'intensité de recyclage en permettant à une unité d'intrant de traverser plusieurs compartiments avant son exportation. Au contraire, les pratiques d'IAE passives (IAE_P) requièrent de fortes importations d'EB, qui s'accumulent dans un compartiment (troupeau) avant son exportation. Les pratiques d'IAE_A participent à améliorer la diversité des flux et des activités et l'autonomie des exploitations en créant des flux inter-compartiment, renforçant ainsi la complexité du réseau. Ces flux réduisent les importations et accroissent donc l'autonomie des exploitations (autonomie fourragère principalement). Enfin les pratiques d'IAE améliorent l'efficacité et la productivité des surfaces corroborant les résultats de (Stark, 2016). Les agroécosystèmes les plus diversifiés ont de meilleures performances environnementales (Malézieux, 2012) car la diversité des flux internes améliore le niveau de recyclage (Stark, 2016).

Dans les écosystèmes, la maturité des systèmes, liée à leur diversité et complexité, assure une meilleure productivité, une plus grande efficacité et une meilleure résilience (Tilman *et al.*, 2002 ; Gliessman, 2005 ; Ulanowicz *et al.*, 2009 ; Gomes *et al.*, 2015). L'agriculture durable doit assurer la conservation et l'usage raisonné des ressources, être écologiquement saine et économiquement viable (Knezek *et al.*, 1988). Les systèmes mettant en œuvre les pratiques d'IAE_A et d'IAE_{AP} sont plus diversifiés et plus autonomes en énergie brute. Les systèmes valorisant le milieu extérieur (IAE_P), malgré une bonne couverture des besoins en FO, sont peu diversifiés en flux interne et peu autonomes en énergie brute. Si à l'échelle des exploitations, la durabilité des systèmes pratiquant l'IAE_P est faible, ces systèmes contribuent cependant à un transfert de biomasse du *saltus* vers *l'ager*, nécessaire au renouvellement de la fertilité des sols (Diarisso *et al.*, 2015 ; Dugué *et al.*, 2013 ; Dugué et Dongmo, 2004).

L'ensemble des systèmes présentent des marges de progrès, pour améliorer le niveau de recyclage de la matière organique, considérée comme une fonction essentielle de la durabilité des écosystèmes. Tous les systèmes mixtes ne sont pas durables (Ryschawy *et al.*, 2014) ;

Certains systèmes décrits par Pingali (1993), ne présentent pas d'interactions entre les composantes agricole et d'élevage. Les pratiques d'IAE contribuent pourtant à la durabilité des systèmes par l'intermédiaire des interactions entre composantes. De plus, la production de fumure organique dans des lieux de production appropriés, suivant des techniques adaptées, permet de réduire les pertes en éléments fertilisants (azote) et les émissions de GES (CH_4 et N_2O) vers l'atmosphère, et de régénérer la biomasse des écosystèmes de savane.

La durabilité des exploitations s'évalue aussi en fonction de la quantité et de la nature de l'énergie consommée (renouvelable ou non) par les systèmes. L'autonomie, le recyclage et l'efficacité sont autant de paramètres pour évaluer la durabilité des exploitations.

2.3. Formes d'IAE et performances énergétiques des exploitations de polyculture-élevage

Selon les formes d'intégration agriculture-élevage des exploitations, les systèmes de culture et les systèmes d'élevage mobilisent différemment les diverses formes d'énergies. Les pratiques d'intégration agriculture-élevage (stabulation des animaux, couverture des besoins en fumure organique et en fourrage) et la structure des exploitations (présence d'une sole de coton, orientation de la production de l'exploitation vers agriculture ou l'élevage) déterminent. Ces facteurs influencent les consommations, les productions et les efficacités énergétiques à l'échelle des systèmes de culture et d'élevage.

On observe des **combinaisons spécifiques de formes d'énergies** traduisant des stratégies de gestion différentes en fonction des formes d'intégration agriculture-élevage. Ces stratégies contribuent au maintien, voire à l'accroissement, de la production et améliorent les efficacités énergétiques. La combinaison de l'énergie fossile et l'énergie de travail, mobilisées en quantités importantes, réduit la consommation d'énergie brute, mais n'assurent pas une forte productivité des systèmes de culture. En revanche, les systèmes combinant l'énergie fossile et l'énergie brute en faibles quantités, accroissent la consommation d'énergie de travail, et présentent de faibles productivités.

La présence de coton dans l'assolement et la stabulation des animaux influencent la combinaison des formes d'énergies dans les exploitations pratiquant l'IAE_A. Elles entraînent la mobilisation simultanée d'énergie fossile et d'énergie de travail à l'échelle du système de culture et d'élevage et une faible consommation d'énergie brute à l'échelle du système de culture. Elles assurent une faible EEF des systèmes de culture et d'élevage mais une bonne EEB à l'échelle du système de culture. La culture de coton nécessite un important investissement en main d'œuvre agricole. La stabulation des animaux entraîne une mobilisation du travail liée à l'apparition de nouvelles tâches sur l'exploitation qui est l'entretien des animaux. Il faut assurer l'alimentation en eau et aliments, stocker le fourrage. L'adoption

de la pratique d'IAE a connu des débuts difficiles due à cette nouvelle contrainte dans les exploitations.

La couverture des besoins en FO est importante dans les exploitations qui pratiquent l'IAE_P à travers une forte mobilisation d'énergie brute. Ces systèmes réduisent leur consommation d'énergie fossile et d'énergie de travail vu la rareté de la stabulation des animaux et l'absence de sole de coton. Elles assurent une bonne productivité des systèmes de culture et une bonne EEF des systèmes de culture et d'élevage. Leur EEB reste très faible.

L'absence de sole de coton, les timides pratiques de stabulation et une couverture des besoins en FO moyenne entraîne une mobilisation réduite d'énergie fossile et d'énergie brute dans les exploitations pratiquant une IAE_{AP}. L'EEF et l'EEB sont faibles à moyennes à l'échelle des cultures.

La combinaison des formes d'énergies aboutissant à des productivités différentes rappelle les seuils à atteindre. Les exploitations pratiquant une IAE_P respectent les seuils d'énergie fossile et d'énergie brute ; les exploitations qui pratiquent une IAE_A respectent les seuils d'EF mais pas celles d'EB ; les exploitations qui pratiquent une IAE_{AP} ne respectent ni les seuils d'énergie fossile, ni les seuils d'énergie brute.

L'énergie fossile consommée par l'ensemble des exploitations permet de soutenir voire renforcer la productivité des systèmes (Gallais *et al.*, 2010), prouvant une fois de plus la nécessité de soutenir l'usage des intrants dans les systèmes de polyculture-élevage. L'énergie fossile met en évidence les vertus de l'usage des engrais pour la fertilisation des sols (Coulibaly *et al.*, 2017), et les produits phytosanitaires pour la gestion de l'enherbement et les attaques parasitaires afin d'accroître les rendements des cultures (Aubertot *et al.*, 2005 ; Petit, 2011). Les seuils d'énergie brute à l'échelle des cultures rappellent l'effet positif sur l'accroissement des rendements de l'apport de la matière organique (Coulibaly, 2012 ; Semporé, 2015 ; Serpantié et Ouattara, 2001). Cette étude originale rappelle le rôle primordiale des énergies fossiles (engrais, herbicides, etc.), combinée à l'usage d'énergie brute (fumure organique) dans le soutien de la production agricole de ces exploitations, comme le recommande les agronomes (Pieri, 1989 ; Feller, 1995 ; Bado *et al.*, 1997).

3. Quelles sont les formes d'IAE les plus durables ?

3.1. Effet des pratiques d'IAE sur la durabilité des exploitations de polyculture-élevage

L'application de plusieurs approches dans cette thèse a permis d'évaluer la durabilité environnementale des exploitations agropastorales à travers la considération des seuils recommandés par la recherche pour apprécier le niveau de mise en œuvre de l'IAE (CHAPITRE III à la page 69) ; l'évaluation de la mise en œuvre des principes écologiques

appliqués aux agrosystèmes (CHAPITRE IV à la page 90) (Bénagabou *et al.*, 2017) ; l'analyse énergétique des exploitations agricoles (CHAPITRE V à la page 111). Une vision d'ensemble des indicateurs mobilisés pour évaluer la durabilité des systèmes étudiés est proposée dans le Tableau XV.

Tableau XV. Variables d'appréciation de la durabilité des exploitations de polyculture-élevage

Echelle	Indicateurs	IAE _A	IAE _{AP}	IAE _P
Système de production	Chargement animal (CA en UBT/ha)	+	+/-	-
	Couverture besoin en fourrage (CBF en %)	+	+/-	-
	Couverture besoin en fumure organique (CBFO en %)	-	+/-	+
	Couverture besoin en traction animale (CBTA en %)	+	+	+
Exploitation	Diversité (Li/n, sd)	+	+/-	-
	Recyclage FCI (%)	Variable	Variable	variable
	PL (sd)	+	+/-	-
	Intégration culture-élevage (ICR ; %)	+	+/-	-
Culture	Autonomie (A ; %)	+	+/-	-
	Consommation énergie fossile (CEF en MJ)	-	+	+
	Production énergie brute (PEB en en MJ)	+/-	-	+
	Efficiences énergétique fossile (EEF ; sd)	-	+/-	+
	Efficiences énergétique brute (EEB ; sd)	+	+/-	-
	Efficiences énergétique du travail (EET ; sd)	-	-	+
Troupeau	Efficiences énergétique solaire (EES ; sd)	+	+/-	-
	Consommation énergie fossile (CEF en MJ)	-	+/-	+
	Efficiences énergétique fossile (EEF ; sd)	-	+/-	+
	Efficiences énergétique du travail (EET ; sd)	+/-	+/-	+

(-) valeurs faibles ; (+) valeur élevée ; (+/-) valeur moyenne ; CA : chargement animal ; CBF : couverture des besoins fourragers ; CBFO : couverture des besoins en fumure organique ; CBTA : couverture des besoins en traction animale ; Li/n : densité des liens ; FCI : Finn cycling index ; PL : Path Length ; sd : sans dimension

Le fonctionnement énergétique des exploitations varie en fonction de la forme d'IAE adoptée. L'engagement de l'exploitation vers une forme de pratique d'IAE lui confère un mode de gestion énergétique spécifique. Les pratiques d'IAE_A améliorent la couverture des besoins fourragers (CBF) alors que les pratiques d'IAE_P accroissent la couverture des besoins en fumure organique (CBFO). Cet opposition impacte le fonctionnement énergétique des exploitations (Bénagabou *et al.*, à soumettre 2018). Les pratiques d'IAE_P réduisent l'autonomie en EB alors que les pratiques d'IAE_A l'améliorent. Les pratiques d'IAE_A accroissent les consommations en EF alors que les pratiques d'IAE_P privilégient une consommation d'EB. Enfin les pratiques d'IAE_A améliorent la diversité des flux internes du système alors que les pratiques d'IAE_P la réduisent. Ces oppositions rendent difficiles la détermination de formes d'IAE plus durables. Sans un unique angle de vue, la recherche d'amélioration de la durabilité des exploitations de polyculture-élevage devra s'appuyer sur les contraintes et potentialités des exploitations étudiées et l'environnement dans lequel elles se trouvent.

Cette thèse aborde la durabilité à travers la production et la consommation des différentes formes d'énergies. Cette vision reste restreinte et ne doit pas occulter qu'une agriculture durable (Zahm, 2003 ; Aubertot *et al.*, 2005). s'appuie sur d'autres dimensions sociales et économiques (UNESCO, 1993) voire l'usage raisonné d'autres ressources comme l'eau (Margat, 2005 ; Treyer, 2006).

3.2. Propositions pour relever les freins à la durabilité des exploitations de polyculture-élevage

Les résultats peuvent être rappelés autour de trois points. (i) Une bonne productivité des systèmes de culture n'est possible que si des apports suffisants d'EF et d'EB sont réalisés, nécessitant donc des importations de l'extérieur vers le système. Ces résultats signifient qu'une intensification des systèmes de culture par les intrants fossiles est nécessaire pour accroître la productivité des systèmes et qu'elle doit s'accompagner d'un apport en fumure organique. Pourtant l'énergie brute apportée par la fumure organique importée réduit l'autonomie de l'exploitation. (ii) Le stockage des fourrages permet d'accroître l'autonomie et offre des opportunités de recyclage de l'énergie brute dans l'exploitation ; les exploitations qui exportent leur excédent d'énergie brute ont des marges de manœuvre pour valoriser ce surplus et ainsi accroître leur recyclage ; (iii) que le recyclage de la biomasse est une voie pour assurer un respect des seuils en fumure organique, mais qu'il implique une intensification en énergie de travail dans les exploitations. Pour relever les contraintes posées aux exploitations étudiées, les propositions suivantes sont faites par type d'exploitation agricoles.

La gestion de la fertilité des sols est une condition majeure de la durabilité des exploitations ; la faible fertilisation des surfaces réduit la productivité dans la localité. Les exploitations pratiquant une IAE_P parviennent à couvrir leur besoin en fumure organique en tenant compte de l'arrière effet de 3 ans, mais cela ne concerne que des surfaces limitées à l'échelle du territoire. Les exploitations ne parvenant pas à couvrir les besoins en fumure organique des sols doivent fournir des efforts pour produire de la fumure organique par valorisation des résidus de culture par les animaux, par compostage au champ en augmentant le taux de collecte des biomasses, mais aussi le niveau de production des biomasses à valoriser. Le potentiel existe pour les exploitations à IAE_A car il y a un excédent de résidus de culture qui est exporté. La valorisation de cet excédent peut contribuer à accroître la production de fumure organique. Cette proposition très souvent théorique est limitée sur le terrain par un certain nombre de facteurs (moyen de transport, manque d'eau, mobilisation importante de matière organique, vaine pâture externe, fumure animale). Malgré des techniques proposées pour faciliter sa mise en œuvre (Berger, 1996b).

Pour les exploitations caractérisées par une IAE_{AP} où le potentiel n'existe pas, il sera toujours difficile de couvrir les besoins en fumure organique. On pourrait améliorer l'apport en engrais minéral. Mais ces exploitations accèdent très difficilement aux intrants agricoles et d'élevage fabriqués à partir d'énergie fossile. L'apport de l'énergie fossile n'est pas mauvais en soit dans les pays en développement, où le premier souci est d'assurer une sécurité alimentaire (Dugué; 2013). De plus les consommations en énergie fossile sont encore très faibles pour assurer, impacter, émettre des quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Du point de vue de l'autonomie fourragère, les exploitations à IAE_P importent au moins 78% de la biomasse de l'extérieur servant à des fins d'alimentation des hommes et des animaux, de fertilisation des champs. Dans la commune de Koumbia la mobilité des animaux au pâturage reste possible malgré la forte augmentation de la pression foncière (Vall et Diallo, 2009). En effet, l'accroissement démographique est un facteur d'évolution des relations entre agriculture et élevage. L'augmentation de la pression foncière justifie l'intensification des productions agricoles et d'élevage et en même temps le renforcement des interactions entre agriculture et élevage (Powell *et al.*, 2004). Mais ces systèmes sont amenés à évoluer. Ils devront adapter la taille des troupeaux et des surfaces cultivées, adapter les variétés cultivées et le niveau d'intensification afin de renforcer le recyclage et les interactions entre les deux activités. Sinon, les systèmes d'élevage devront changer de milieu (transhumance temporaire ou définitive) et cela impactera la disponibilité en fumure organique et la durabilité globale des systèmes.

Par ailleurs, l'évaluation de la durabilité est rendue possible par l'appréhension des pratiques d'intégration agriculture-élevage sur l'efficacité énergétique fossile à l'échelle de l'exploitation et des cultures. Cette évaluation montre une tendance à l'amélioration de l'efficacité énergétique fossile à l'échelle des exploitations et des cultures permises par la pratique de production de fumure organique (CBFO) et par la pratique de stockage de fourrages (CBF), l'amélioration de l'efficacité énergétique brute. Chaque pratique d'IAE améliore une efficacité énergétique donnée.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cette thèse, l'étude de la structure et du fonctionnement d'une diversité d'exploitations mixtes de polyculture-élevage a permis de caractériser différentes formes d'intégration agriculture-élevage et d'identifier parmi elles, les formes d'intégration agriculture-élevage permettant d'atteindre des niveaux de performance énergétique élevés. La durabilité des exploitations mixtes de polyculture-élevage, du point de vue de l'utilisation des différentes ressources d'énergies, a été évaluée à partir de plusieurs approches complémentaires.

Premièrement, la durabilité a été évaluée pour 3 types d'exploitations mixtes (agriculteurs, éleveurs et agro-éleveurs) à travers leur consommation des énergies non renouvelables (énergie fossile) à partir de la méthode PLANETE Savane, dans le CHAPITRE III (page 69). Cette analyse a permis de caractériser le fonctionnement énergétique de ces exploitations, de révéler leur profil énergétique et d'analyser le lien entre les piliers de l'intégration agriculture-élevage (fourrage, fumure organique et traction animale) et l'efficacité énergétique fossile (EEF), à l'échelle des exploitations agricoles. Les résultats montrent que les éleveurs qui présentent les meilleures EEF, consomment de faibles quantités d'énergie fossile et produisent des quantités d'énergie brute élevées. Les agro-éleveurs et agriculteurs présentent de très faibles EEF. Les agriculteurs consomment de très faibles quantités d'énergie fossile pour produire de faibles quantités d'énergie brute, alors que les agro-éleveurs consomment beaucoup d'énergie fossile pour assurer une forte production d'énergie brute. La traction animale et la production de fumure organique améliorent l'EEF, sans réduire nécessairement la consommation d'énergie fossile. Elles agissent sur l'EEF soit directement (fumure organique) ou indirectement (traction animale) en accroissant la production d'énergie brute. Le stockage de fourrages n'améliore pas l'EEF car les quantités stockées sont trop faibles pour réduire les consommations d'énergie fossile. Ces résultats montrent que les pratiques d'intégration agriculture-élevage améliorent globalement l'EEF. Cependant, la prise en compte unique de l'énergie fossile dans les consommations de l'exploitation n'explique que partiellement leur fonctionnement énergétique en occultant la consommation des autres formes d'énergies.

La deuxième partie des résultats traitant de la caractérisation des pratiques d'intégration agriculture-élevage à l'échelle des exploitations mixtes de polyculture-élevage dans le

CHAPITRE IV (page 90) a également révélé une diversité de pratiques de stockage de fourrage (foin, paille, fane et culture fourragère), de production de fumure organique (terre de parc, fumier, compost et boue de biodigester) et aussi d'utilisation de la traction animale (travail du sol, entretien des cultures et transport). Cette analyse a permis d'identifier trois formes d'intégration agriculture-élevage mises en œuvre par les exploitations : une intégration agriculture-élevage active (IAE_A) dans les exploitations qui fournissent des efforts pour couvrir les besoins des animaux et des sols à partir des ressources internes, une intégration agriculture-élevage passive (IAE_P) où les éleveurs ont recours aux ressources extérieures pour couvrir ces besoins en s'appuyant sur la mobilité animale et une IAE_{AP} intermédiaire entre les deux formes précédentes. Cependant, cette analyse de l'intégration agriculture-élevage n'a pas permis de conclure sur la durabilité des exploitations. Pour évaluer cette durabilité nous avons mobiliser la méthode d'analyse des réseaux écologiques, pour étudier le recyclage de l'énergie brute au sein du système complexe qu'est l'exploitation mixte de polyculture-élevage. Les résultats montrent que les exploitations mettant en œuvre une IAE_A présentent une diversification du nombre de flux échangés entre les différentes composantes du réseau, sont plus autonomes grâce à une intensité du recyclage plus forte et présentent une bonne efficacité énergétique brute. Les exploitations pratiquant une IAE_P sont moins diversifiées en termes de nombre de flux, très dépendantes du milieu extérieur et ont une faible intensité de recyclage de l'énergie brute. Cependant l'indice de recyclage amélioré dans le cas de l' IAE_A , reste très variable d'une exploitation à l'autre, et n'est pas uniquement lié aux pratiques d' IAE mais à l'ensemble des activités menées sur les exploitations (présence de coton dans l'assolement, autoconsommation, etc.).

Enfin, l'évaluation de la durabilité des exploitations mixtes de polyculture-élevage par la méthode pluri-énergie, dans le CHAPITRE V (page 111), s'appuie sur la prise en compte de quatre formes d'énergie consommées : énergie fossile (EF) ; énergie brute (EB) ; énergie liée au travail (ET) ; et énergie solaire (ES) avec pour objectif de décrire le fonctionnement énergétique des exploitations et d'étudier les liens entre les profils énergétiques (consommation, production, efficacité) et les pratiques d'intégration agriculture-élevage aux trois échelles (exploitation, système de culture, système d'élevage). *A l'échelle des exploitations*, les consommations d'EF et d'ET sont très variables d'une exploitation à une autre, et la consommation et la production d'EB s'élèvent à mesure que la taille du troupeau augmente. La taille du troupeau détermine le niveau de l'EEF alors que la sole de coton détermine le niveau de l'EEB. *A l'échelle des cultures*, une sole de coton entraîne une augmentation des consommations d'EF et une amélioration de l'EEB alors que la taille du troupeau implique une forte consommation d'EB. Les producteurs ont des pratiques, des stratégies qui ont un effet d'ajustement sur les niveaux de consommation d'EF et d'EB pour accroître la production d'EB. L'ET est intensément employée par les activités agricoles. A

l'échelle du troupeau, la taille du troupeau permet une réduction de la consommation d'EF et d'ET et une amélioration de l'EEF et l'EET. Par contre, les ruminants restent soumis à la fonction de digestion par une consommation du fourrage pour produire des déjections, ce qui représente une consommation liée à une production d'EB par les troupeaux. La conséquence est la faible variabilité de l'EEB d'une exploitation à une autre.

L'Intégration agriculture-élevage améliore l'EEF malgré un accroissement des quantités d'EF consommées à l'échelle des exploitations et en parallèle une consommation de plus en plus élevées d'ET (énergie musculaire des animaux et des hommes). La forte mobilisation d'ET s'accompagne d'une forte consommation d'EF sur les cultures comme le coton (engrais, pesticides) et sur les troupeaux (stabulation des animaux, collecte et stockage des fourrages, distribution des aliments, abreuvement, gardes). Les résultats montrent un gradient d'effort d'intégration agriculture-élevage permettant l'identification de trois formes d'intégration agriculture-élevage mettant l'accent sur des pratiques d'IAE spécifiques et correspondant à des profils énergétiques spécifiques. L'intégration agriculture-élevage active (IAE_A) implique une consommation forte d'EF à l'échelle des cultures, et un fort investissement en travail (ET), une faible consommation d'EB, entraînant un niveau de production d'EB moyen et une bonne EEB. Les producteurs privilégient alors le stockage de fourrages et assurent ainsi une meilleure couverture des besoins en fourrages des animaux, leur permettant d'accroître leur autonomie, la diversité des flux et le recyclage de l'énergie brute. En revanche, la couverture des besoins des sols en fumure organique et une bonne productivité s'appuient sur une forte importation de biomasse. L'intégration agriculture-élevage passive (IAE_P) à l'échelle des cultures engendre une forte consommation d'EB, une réduction des consommations d'EF et d'ET et un accroissement de la production d'EB et de l'EEF grâce à la mobilité animale. Les producteurs investissent davantage dans la production de fumure organique et assurent une bonne couverture des besoins en fumure organique des sols. Dans les formes d'intégration agriculture-élevage intermédiaires (IAE_{AP}), les exploitations ne présentent ni une bonne production d'EB, ni de bon score d'efficacité que ce soit en EEF ou en EEB.

L'intensification des systèmes de culture par des intrants fossiles est nécessaire pour accroître la productivité mais devrait s'accompagner d'une plus grande utilisation de fumure organique, donc d'une plus forte consommation d'énergie brute. Il y'a des seuils en énergie fossile et énergie brute à dépasser, caractérisés dans cette étude, pour accroître la productivité des terres mises en cultures. Pour dépasser les seuils en énergie brute les exploitations pratiquant une IAE_P s'appuient sur de fortes importations de biomasse. Or la commune de Koumbia connaît actuellement une forte pression sur les ressources naturelles et en conséquence ce mode d'intégration IAE_P sera difficile à perpétuer. Dans le cas des exploitations pratiquant une intégration active (IAE_A) l'excédent de résidus de culture observés sur leur exploitation est une

réelle opportunité qui pourrait être valorisée pour accroître la quantité d'énergie brute mobilisée.

L'intensification des systèmes de culture par des intrants fossiles reste nécessaire pour accroître la productivité mais devrait s'accompagner d'une plus grande utilisation de fumure organique, donc d'une plus forte consommation d'énergie brute par les exploitations. Il y a des seuils en énergie fossile et énergie brute à dépasser, caractérisés dans cette étude, pour accroître la productivité des terres mises en cultures. Pour dépasser ces seuils, les exploitations qui pratiquent une intégration passive (IAEP) s'appuient sur de fortes importations de biomasse pour l'affouragement des animaux. Les exploitations pratiquant une intégration active (IAEA) consomment des biomasses extérieures pour couvrir les besoins des sols en fumure organique. Or les ressources naturelles des zones des savanes d'Afrique de l'Ouest sont soumises à de fortes pressions (réduction des espaces, fort taux de prélèvement, etc.) et en conséquence ces modes d'intégration pourraient être difficile à perpétuer dans les conditions actuelles. Des actions permettant une augmentation de la production de biomasse utile dans les exploitations et hors exploitations viendraient soutenir l'intégration agriculture-élevage : le développement de cultures fourragères et des cultures à double usage (grains et fourrage), l'amélioration des pâturages, le reboisement avec des espèces à usages multiples (fruits, fourrages, bois) ou plantation de banque fourragère. Cependant, il paraît en parallèle nécessaire d'améliorer les modes de gestions des biomasses existantes à travers la mise en application de charte foncière négociée à l'échelle des territoires villageois (exemple charte foncière locale de Koumbia) afin de favoriser les pratiques de stockage des résidus de culture produits avant l'ouverture de la vaine pâture, et de raisonner la gestion des biomasses collectives pour éviter leur appropriation par un groupe et leur dégradation.

L'intensification des systèmes d'élevage et l'intégration agriculture-élevage active, passant par la stabulation des animaux et leur affouragement à l'auge engendre une intensification en énergie du travail humain et animal (production et stockage des résidus de culture et de fourrage, abreuvement, nettoyage des parcs, gestion de la fumure organique...). Il faudrait accompagner les exploitations pour permettre la réorganisation du travail nécessaire dans leurs exploitations pour absorber la charge de travail supplémentaire engendrée par l'intégration agriculture-élevage. De plus, il semble nécessaire de trouver des solutions techniques pour lever les difficultés liées au manque ou à l'inadéquation des équipements pour réduire la pénibilité et le temps de travail nécessaire. L'épandage tracté de fumure organique, ou la production de fumure organique à moindre investissement en travail sont deux voies envisagées. Le développement de botteleuses adaptées aux types de résidus et à la taille des parcelles faciliterait les travaux de ramassage et stockage des fourrages. Des installations d'élevage adaptés au contexte permettraient aussi de faciliter le nettoyage des étables.

Les pratiques d'intégration agriculture-élevage contribuent à la durabilité des agroécosystèmes. La durabilité et la productivité des exploitations mixtes de polyculture-élevage nécessitent une amélioration du recyclage interne des biomasses accompagnée d'un soutien aux importations d'énergie brute et fossile, et d'investissements supplémentaires en énergie de travail.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achard, F., Hiernaux, P. Banoïn, M. 2001. Les jachères fourragères naturelles et améliorées en Afrique de l'Ouest. *La jachère en Afrique tropicale* **2** : 201–239.
- Alary, V., Duteurtre, G. Faye, B. 2011. Élevages et sociétés : les rôles multiples de l'élevage dans les pays tropicaux. *Productions Animales* **24** :145-156.
- Allafort, M. T. 1983. La culture attelée dans les pays de l'Afrique de l'Ouest. Note de synthèse, Université Claude Bernard, Lyon, France, 42 p.
- Allesina, S. Bondavalli, C. 2004. WAND: An ecological network analysis user-friendly tool. *Environmental Modelling et Software* **19** :337–340.
- Allesina S., Ulanowicz R.E., 2004. Cycling in ecological networks: Finn's index revisited. *Computational Biology Chemistry* **28**: 227–233.
- Altieri, M. A., Letourneau, D. K. Davis, J. R. 1983. Developing Sustainable Agroecosystems. *BioScience* **33** :45–49.
- Altieri, M. A. 1986. *L'Agroécologie : bases scientifiques d'une agriculture alternative*. Eds Debard, Paris. 237 p.
- Altieri, M. A. 1995. *Agroecology : The Science of Sustainable Agriculture, 2nd eds*. CRC Press. New York, 53 p.
- Altieri, M. A. 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, ecosystems et environment*, **93** (1-3) : 1-24.
- Altieri, M. A. Nicholls, C. I. 2005. Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture. United Nations Environmental Programme, Environmental Training Network for Latin America and the Caribbean, Mexico, 291 p.
- Altieri M. A. 2008. Small farms as a planetary ecological asset: five key reasons why we should support the revitalisation of small farms in the global South. Third World network, Penang, Malaysia, 24 p
- Altieri, M. A., Funes-Monzote, F. R. Et Petersen, P. 2012. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agronomy for Sustainable Development* **32**:1–13.
- Alvarez S., Rufino M.C., Vayssières J., Salgado P., Tiftonell 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. *Agriculture Systems*, **126** : 25–37.
- Andrieu, N., Dugue, P., Gal, P.-Y. L. Schaller, N. 2009. Modéliser le fonctionnement d'exploitations agricoles de polyculture élevage pour une démarche de conseil. Cas de la zone cotonnière de l'ouest du Burkina Faso. In « *Savanes africaines en développement : innover pour durer* », 20-23 avril 2009. Garoua, Cameroun, 10 p.
- Andrieu, N., Bayala, I., Coulibaly, K., Dabire, D., Diallo, A. M., Djamen, P., Douzet, J.-M., Karambiri, M. Havard, M. 2014. Comment co-construire des systèmes de production à base d'agriculture de conservation en Afrique de l'Ouest ? *Grain de sel n°63 - 66 - juillet 2013 – juin 2014* Agroécologie en Afrique de l'Ouest et du Centre. 4 p.
- Andrieu N., Vayssières J., Corbeels M., Blanchard M., Vall E., Tiftonell P., 2015. From farm scale synergies to village scale trade-offs: Cereal crop residues use in an agro-pastoral system of the Sudanian zone of Burkina Faso. *Agricultural Systems*, **134** : 84-96.
- Asafu-Adjaye, J. 2000. The relationship between energy consumption, energy prices and economic growth: time series evidence from Asian developing countries. *Energy Economics* **22** : 615–625.
- Aubertot, J.-N., Barbier, J. M., Carpentier, A., Gril, J. J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, Savini, I. Voltz (EDS), M. 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Rapport d'expertise scientifique collective INRA et Cemagref (décembre 2005), France, 69 p.

- Aubreville, A. 1957. Accord à Yangambi sur la nomenclature des types africains de végétation. *Bois et forêts des tropiques* **51** : 23–27.
- Augusseau, X., Cheylan, J.-P., Liehoun, E. 2004. Organisation sociale et usage des ressources. *Cahiers Agricultures* **13** : 488–494.
- Autfray, P., Sissoko, F., Falconnier, G., Ba, A., Dugué, P. 2012. Usages des résidus de récolte et gestion intégrée de la fertilité des sols dans les systèmes de polyculture élevage : étude de cas au Mali-Sud. *Cahiers Agricultures* **21** : 225–234.
- Bado, B. V., Sédogo, M. P., Cescas, M. P., Lompo, F., Bationo, A. 1997. Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures* **6** (6) : 571–575.
- Badolo, H. 2009. *Monographie de la région des Hauts Bassins*. Ministère de l'Economie et des Finances, Ouagadougou, Burkina Faso. 154 p.
- Basu, P., Scholten, B. A. 2012. Crop–livestock systems in rural development: linking India's Green and White Revolutions. *International Journal of Agricultural Sustainability* **10** : 175–191.
- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., Kimetu, J. 2007. Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agroecosystems. *Agricultural Systems* **94** : 13–25.
- Bauquis, P.-R. 2001. Un point de vue sur les besoins et les approvisionnements en énergie à l'horizon 2050. *Revue de l'IFP*, **27** (4).
- Bonaudo, T., Bendahan, A.B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., Magda, D., Tichit, M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy* **57** : 43–51.
- Bénagabou O.I., 2011. Contribution de l'association agriculture-élevage dans l'amélioration du bilan du flux énergétique dans les systèmes agro-pastoraux : cas de Koumbia. Mémoire d'ingénieur, Institut du Développement Rural, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 59 p.
- Bénagabou O.I., 2013. Effet de la pratique de l'intégration agriculture-élevage sur l'efficacité énergétique des exploitations agricoles dans les systèmes agro-pastoraux du Burkina Faso. Mémoire de DEA, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 97 p.
- 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 Recherche Ruminants* **20** : 298.
- Bénagabou, O. I., Blanchard, M., Vayssières, J., Vigne, M., Vall, E., Lecomte, P., Bougouma, V. Nacro, H. B. 2015. Crop-Livestock Integration improves the Energy Use Efficiency of smallholder mixed farming systems - the case of western Burkina Faso; *Farming System Design* : 359–360.
- Bénagabou O.I., Blanchard M., Bougouma Yameogo V., Vayssières J., Vigne M., Vall E., Lecomte P., Nacro H.B., 2017. L'intégration agriculture-élevage améliore-t-elle l'efficacité, le recyclage et l'autonomie énergétique brute des exploitations familiales mixtes au Burkina Faso ? *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux* **70** (2) : 31–41.
- Bénagabou, O. I., Blanchard, M., Bougouma/Yaméogo, M. C. Vigne, M. soumis 2019. Performance énergétique fossile des exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso : Rôle des pratiques d'intégration agriculture-élevage. *Cahiers Agricultures (soumis)*.
- Bénagabou, O. I., Blanchard, M., Vigne, M., Vayssières, J., Vall, E., Lecomte, P., Bougouma Yaméogo, V. M. C. Nacro, H. B. à soumettre 2018. Evaluation Pluri-énergie des exploitations familiales mixtes de l'Ouest du Burkina Faso : Rôle de l'intégration agriculture-élevage dans la mobilisation des différentes formes d'énergie. *Journal of Agricultural Science* (en préparation).
- Benoit, M., Laignel, G., Roulenc, M. 2010. Emissions de gaz à effet de serre et consommations d'énergie en élevage ovin viande. *Rencontres Recherche Ruminants*, **17** : 351–354.
- Bensin, B. M. 1925. *Agroecological Characteristics Description and Classification of the Local Corn Varieties-chorotypes*. 20 p.

- 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 et fibres tropicales*, **42** : 201-210.
- Berger, M. 1991. La gestion des résidus organiques à la ferme In : Savanes d'Afrique, terres fertiles ? Piéri C. (ed.). Paris : Ministère de la coopération, 293-315. Montpellier, France, 10 - 14 Décembre 1990.
- Berger, M. 1996a. L'amélioration de la fumure organique en Afrique soudano-sahélienne. *Agriculture et développement*. numéro hors-série, 58 p.
- Berger, M. 1996b. Fumure organique : des techniques améliorées pour une agriculture durable. *Agriculture et développement* **10** : 37-46.
- Bernard, J., Le Gal, P.-Y., Triomphe, B., Hostiou, N. Moulin, C.-H. 2011. Involvement of small-scale dairy farms in an industrial supply chain: when production standards meet farm diversity. *Animal* **5** : 961–971.
- Bernardet, P. 1984. L'association agriculture-élevage en Côte d'Ivoire septentrionale. Utilisation des déjections animales à des fins agricoles. Pp. 187–210 *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 31^e année, bulletin n°3-4, Juillet-décembre 1984.
- Berton, S., International, A., Billaz, R., Burger, P. Lebreton, A. 2013. Agroécologie, une transition vers des modes de vie et de développement viables Paroles d'acteurs Photo de couverture : Agrisud International.
- Blanc, M. Perrier-Cornet, P. 1999. Emploi agricole : les cadres d'analyse à l'épreuve des dynamiques actuelles. *Economie rural* **253** : 8–14.
- Blanchard, M. 2005. Relations agriculture élevage en zone cotonnière : territoire de Koumbia et Waly, Burkina Faso. Université Paris XII, Val de Marne, France. 97 p.
- Blanchard M., 2010. Gestion de la fertilité des sols et rôle du troupeau dans les systèmes coton-céréales-élevage au Mali-Sud, savoirs techniques locaux et pratiques d'intégration agriculture élevage. Thèse de doctorat, Science de l'univers et environnement, Créteil, UPEC, 303 p.
- Blanchard, M., Bognini, S. Dugué, P. 2012. Gestion agropastorale de la fertilité. Projet Fertilpartenaires, CIRAD-CIRDES-UPPCT-INADES, Montpellier, France. 4 p.
- Blanchard, M. Vall, E. 2010. Production et utilisation de la fumure organique au Mali-Sud : savoirs des paysans face aux savoirs des agronomes, quels enseignements pour le développement ? In Thibaud B., François A. Editions KARTHALA, Université de Poitiers-ICOTEM, Paris, 313 p.
- Blanchard M., Vayssières J., Dugué P., Vall E., 2013. Local technical knowledge and efficiency of organic fertilizer production in South Mali: diversity of practices. *Agroecology. Sustainable. Food Systems*, **37**, 672–699.
- Blanchard M., Coulibaly K., Bognini S., Dugué P., Vall E., 2014. Diversité de la qualité des engrais organiques produits par les paysans d'Afrique de l'Ouest : quelles conséquences sur les recommandations de fumure ? *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* **18** (4), 512-523
- Blanchard M., Vall E., Tinguéri L.B., Meynard J.-M., 2017. Identification, caractérisation et évaluation des pratiques atypiques de gestion des fumures organiques au Burkina Faso : sources d'innovation ? *Autrepart* , (1) 115–134.
- Bochu J.L., 2002. PLANETE : Méthode pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre. SOLAGRO, Toulouse (France), 10 p.
- Bochu, J.-L., Couturier, C., Pointereau, P., Charru, M. Chantre, E. 2005. Maîtrise de l'énergie et autonomie énergétique des exploitations agricoles françaises : état des lieux et perspectives d'actions pour les pouvoirs publics. *Synthese de l'étude-référence, MPA*. **5** : B1. 100p.
- Bonnet, J.-F. Combarnous, M. 1996. Du rayonnement solaire à la production de biomasse végétale terrestre. Une vision schématique des flux d'énergie. *Revue Générale de Thermique*, **35** : 527–542.

- Bonny S., 2010. L'intensification écologique de l'agriculture : voies et défis. In Coudel E., Devautour H., Soulard CT., Hubert B., (Eds.) ISDA 2010, juin 2010, Montpellier (France). CIRAD-INRA-SUPAGRO, France, 11 p.
- Bonny, S. 2011. Ecologically intensive agriculture: Nature and challenges. *Cahiers Agricultures*, **20** (6) : 451–462.
- Bosma, R., Bengaly, M., Defoer, T., Powell, J. M., Fernández-Rivera, S. Williams, T. O. 1993. Pour un système durable de production au Mali-Sud: accroître le rôle des ruminants dans le maintien de la manière organique des sols. In. *International Conference on Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa, Addis Ababa (Ethiopia) 22-26 Nov 1993*.
- Boudet, G. 1961. Problèmes de l'association agriculture-élevage en zone soudanienne: résultats expérimentaux obtenus au centre de recherche zootechniques de Sotuba-Bamako (République du Mali). *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* **14** : 75–85.
- Boudet, G. Rivière, R. 1968. Emploi pratique des analyses fourragères pour l'appréciation des pâturages tropicaux. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* **21** : 227.
- Boudet, G. 1984. *Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères*. Ministère des relations extérieures, coopération et développement, Paris, France. 267 p.
- Boutrais J., 1992. - L'élevage en Afrique tropicale : une activité dégradante ? *Afrique Contemporaine*, **161** : 109-125.
- Brossier, J. 1987. Système et système de production : note sur ces concepts. *Cahiers des sciences humaines* **23** (3-4): 377-390.
- Burel, F. Garnier, E. 1994. Chapitre 1. Les effets de l'agriculture sur la biodiversité. ESCo "Agriculture et biodiversité" - Chapitre 1. 139 p.
- Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J. M. Abel, N. 2001. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems* **4** : 765–781.
- Cascailh, A., Belveze, J., Bordet, C. (2012). Consommations d'énergie dans les exploitations agricoles de Midi-Pyrénées et création d'un réseau de conseil aux agriculteurs. *Innovations Agronomiques* **25** : 15-25
- Cassman, K. G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **96** : 5952–5959.
- Celette, F., Findeling, A. Gary, C. 2009. Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system: The case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy* **30**:41–51.
- Chagunda, M. G. G., Flockhart, J. F. Roberts, D. J. 2010. The effect of forage quality on predicted enteric methane production from dairy cows. *International Journal of Agricultural Sustainability* **8** : 250–256.
- Chaubet, B. 1992. diversité écologique, aménagement des agro-écosystèmes et favorisation des ennemis naturels des ravageurs : cas des aphidiphages. *Courrier de la Cellule Environnement de l'INRA* n° 18 : 45-63.
- Chia. 2004. Principes, méthodes de la recherche en partenariat : une proposition pour la traction animale. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* **57** : 233–240.
- Conway, G. 2005. The doubly-green revolution. *The Earthscan reader in sustainable agriculture*. Earthscan, London ; Sterling, VA. PP : 115–28
- Conway, G. R. 1985. Agroecosystem Analysis for Research and Development. Winrock International Institute for Agricultural Development, Bangkok, Thailand. 105 p.
- Cordonnier, T. 2004. Perturbations, diversité et permanence des structures dans les écosystèmes forestiers. Thèse de doctorat, Université Paris XI, Paris, France, 260 p.



- Coulibaly K., 2012. Analyse des facteurs de variabilité des performances agronomiques et économiques des cultures et de l'évolution de la fertilité des sols dans les systèmes agropastoraux en milieu soudanien du Burkina Faso : approche expérimentale chez et par les paysans. Thèse de doctorat, Science du Sol, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 139 p.
- Coulibaly, K., Vall, E., Autfray, P., Bacyé, B., Somda, I., Nacro, B. H. Sedogo, M. P. 2012a. Co-conception d'itinéraires techniques de culture pure du niébé et du mucuna dans la zone cotonnière ouest du Burkina Faso : intérêts et limites. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, **106** (2), 139-155.
- Coulibaly, K., Vall, E., Autfray, P., Nacro, H. Sedogo, M. 2012b. Effets de la culture permanente coton-maïs sur l'évolution d'indicateurs de fertilité des sols de l'Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **6** (3), 1069-1080
- Coulibaly, K., Vall, E., Autfray, P. Sedogo, P. M. 2012c. Performance technico-économique des associations maïs/niébé et maïs/mucuna en situation réelle de culture au Burkina Faso: potentiels et contraintes. *Tropicultura*, **30** :147–154.
- Coulibaly, K., Koutou, M., Diallo, A. Sangaré, M. 2017. Performances agro-économiques de la micro-dose d'engrais sur les cultures associées en zone cotonnière de l'Ouest du Burkina Faso- *International Journal of Innovation and Applied Studies*, **20** (1) : 170 – 186.
- Dalsgaard, J. P. T., Lightfoot, C. Christensen, V. 1995. Towards quantification of ecological sustainability in farming systems analysis. *Ecological Engineering* **4** :181–189.
- Dalsgaard J.P.T., Oficial R.T., 1997. A quantitative approach for assessing the productive performance and ecological contributions of smallholder farms. *Agriculture Systems*, **55**, 503–533.
- Dame, R. F. 1972. The ecological energies of growth, respiration and assimilation in the intertidal American oyster *Crassostrea virginica*. *Marine biology* **17** : 243–250.
- D'Aquino, P., Lhoste, P., Masson, A. L. 1995. Systèmes de production mixtes agriculture pluviale et élevage en zones humide et sub-humide d'Afrique. CIRAD-EMVT. 90 p.
- D'aquino, P., Lhoste, P., Le Masson, A. 1998. Systèmes de production mixtes agriculture pluviale et élevage en zones humide et sub-humide d'Afrique. *Cahiers Agricultures*, **7** : 93-103.
- Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B. Milestad, R. 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **30** : 545–555.
- De Ridder, N., Sanogo, O. M., Rufino, M. C., Van Keulen, H. GILLER, K. E. 2015. Milk: the new white gold? Milk production options for smallholder farmers in Southern Mali. *Animal* **9** : 1221–1229.
- Delma J.B., 2016. Co-conception et accompagnement de projets d'élevage familiaux innovants dans l'Ouest du Burkina Faso. Thèse de doctorat, Systèmes de production animale, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 126 p.
- Delma, B. J., Bougouma-Yameogo, V., Nacro, H. B. Vall, E. 2016. Fragilité des projets d'élevage familiaux dans les exploitations de polyculture-élevage au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, **25** : 35005 (8 p).
- Devendra, C. Thomas, D. 2002. Crop–animal interactions in mixed farming systems in Asia. *Agricultural Systems* **71** : 27–40.
- Diallo, M. A., Vall, E. Bayala, I. 2011. La construction d'un dispositif de gouvernance territoriale pour la gestion des ressources naturelles : Le cas de la charte foncière locale de Koumbia. *Burkina Faso. In Partenariat, modélisation, expérimentations : quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique ?* Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. CIRAD. 6 p.
- Diarisso, T. 2015. Analyse des flux de biomasse et des transferts de la fertilité à l'échelle du territoire villageois en Afrique sub-sahélienne : opportunités d'intégration fonctionnelle agriculture - élevage. Thèse de doctorat, Science d'Agronomiques, SupAgro (Montpellier). 123 p.
- Diarisso T., Corbeels M., Andrieu N., Djamen N. P., Tittonell P., 2015. Biomass transfers and nutrient budgets of the agro-pastoral systems in a village territory in south-western Burkina Faso. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **101** (3) : 295-315.

- Dongmo A.L., 2009. Territoires, troupeaux et biomasses : enjeux de gestion pour un usage durable des ressources au nord-Cameroun. Thèse de doctorat, Agronomie et Zootechnie, Agro Paris Tech, Paris, France. 240 p.
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., Tittone, P. 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy* **34** : 197–210.
- Dorin B., Paillard S., Treyer S., 2010. Agrimonde: Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050. Éditions Quae. 144 p
- Douxchamps, S., VAN Wijk, M. T., Silvestri, S., Moussa, A. S., Quiros, C., Ndour, N. Y. B., Buah, S., Somé, L., Herrero, M., Kristjanson, P., Ouedraogo, M., Thornton, P. K., Van Asten, P., Zougmore, R. Rufino, M. C. 2016. Linking agricultural adaptation strategies, food security and vulnerability: evidence from West Africa. *Regional Environmental Change*, **16** : 1305–1317.
- Drep-Ouest. 2001. Monographie province du Tuy, Bobo-Dioulasso. Burkina Faso. 61 p.
- Dufumier, M. 2002. *Un agronome dans son siècle: Actualité de René Dumont* (KARTHALA-INAPPEG). 321 p.
- 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. *Agriculture Développement*, **18**, 99–107.
- Dugué, P. 2002. Flux de biomasse et gestion de la fertilité à l'échelle des terroirs : étude de cas au Nord-Cameroun et essai de généralisation aux zones de savane d'Afrique sub-saharienne. CIRAD, Montpellier, France. pp. 27–59.
- Dugué, P. Dongmo, N. A. L. 2004. Traction animale et association agriculture élevage dans les savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre. D'un modèle techniciste à une démarche d'intégration raisonnée à différentes échelles. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux* **57** : 157.
- Dugué P., Vall E., Lecomte P., Klein H.-D., Rollin D., 2004. Evolution des relations entre l'agriculture et l'élevage dans les savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre - Un nouveau cadre d'analyse pour améliorer les modes d'intervention et favoriser les processus d'innovation. *OCL*, **11** (4-5) : 268-276.
- Dugué, P. 2013. Intensification écologique, agroécologie, intensification durable de l'agriculture : pourquoi cela concerne-t-il aussi les agriculteurs ouest-africains ? Blog FARM. 7 p.
- Dumont, B., Fortun-Lamothe, L., Jouven, M., Thomas, M. Tichit, M. 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal* **7** (6) : 1028–1043.
- Dumont, B., Thomas, M., Fortun-Lamothe, L., Jouven, M. Tichit, M. 2014. Les principes de l'agroécologie pour les systèmes d'élevage : questions de recherche pour la filière piscicole. Quatrième Journées de la recherche fili-re piscicole, 2-4 Juillet 2014. INRA.
- Edwards C.A., Grove T.L., Harwood R.R., Colfer C.P., 1993. The role of agroecology and integrated farming systems in agricultural sustainability. *Agriculture Ecosystems and Environment* **46**, 99–121.
- Ellis F., 2000. Rural livelihoods and diversity in developing countries. Oxford university press. 279 p.
- Eastes, R. E. 2010. *Vers une agriculture choisie*. Eds. Le cavalier Bleu, Paris, France.
- Fao. 2005. *Regards sur l'agriculture de conservation en Afrique de l'ouest et du centre et ses perspectives*. Rome, Italy, 114 p.
- Fao. 2015. *Agroecology for Food Security and Nutrition Proceedings of the FAO International Symposium. 18 -19 September*, Rome, Italy, 426 p.
- Fao. 2018. Initiative de passage à l'échelle supérieure de l'agroécologie transformer l'alimentation et l'agriculture au service des ODD. Une proposition préparée pour le symposium international sur l'agroécologie – 3-5 avril 2018, 17 p.

- Fath, B. D. Patten, B. C. 1998. Network synergism: Emergence of positive relations in ecological systems. *Ecological Modelling* **107**:127–143.
- Fath, B. D. Patten, B. C. 1999a. Review of the foundations of network environ analysis. *Ecosystems* **2** : 167–179.
- Fath, B. D. Patten, B. C. 1999b. Quantifying resource homogenization using network flow analysis. *Ecological Modelling* **123**:193–205.
- Fath B.D., Scharler U.M., Ulanowicz R.E., Hannon B., 2007. Ecological network analysis: network construction. *Ecol. Model.* **208**, 49–55.
- 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.
- Feller, C. 1995. La matière organique du sol : un indicateur de la fertilité. Application aux zones sahélienne et soudanienne. *Agriculture et développement*, **8** : 35–41.
- Ferraton, N. Touzard, I. 2009. *Comprendre l'agriculture familiale : diagnostic des systèmes de production*. Editions Quae. 134 p.
- Ferriere, J. . 1997. L'analyse énergétique à l'échelle de l'exploitation agricole. Méthodes, apports et limites. *Fourrages* **151** : 331–350.
- Finn, J. T. 1976. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows. *Journal of Theoretical Biology* **56** : 363–380.
- Finn J.T., 1980. Flow analysis of models of the Hubbard Brook ecosystem. *Ecology* **61**, 562–571.
- Fontès, J. Guinko, S. 1995. *Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Notice explicative du ministère de la Coopération française*. Ministère de la Coopération française, Toulouse, France. 68 p.
- Fores, E. Christian, R. R. 1993. Network analysis of nitrogen cycling in temperate, wetland ricefields. *Oikos* : 299–308.
- Charles, F., & Youngberg, G. (1990). Sustainable agriculture : An overview. *Sustainable Agriculture in Temperate Zones, New York, USA*, 1-12.
- Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T. A., Creamer, N., Harwood, R., Salomonsson, L., Helenius, J., Rickerl, D., Salvador, R., Wiedenhoef, M., Simmons, S., Allen, P., Altieri, M., Flora, C. Poincelot, R. 2003. Agroecology: The Ecology of Food Systems. *Journal of Sustainable Agriculture* **22**: 99–118.
- Gafsi, M. 2007. Exploitations agricoles familiales en Afrique de l'Ouest et du Centre, Synthèses. Editions Quae. CTA. Wageningen, Pays-Bas. 475 p.
- Gagnon, Y.C. 2012. *L'étude de cas comme méthode de recherche*. 2^{ème} Edition. Presses de l'Université du Québec, Canada. 127 p.
- Gallais, A., Gate, P. Oury, F.-X. 2010. Évolution des rendements de plusieurs plantes de grande culture une réaction différente au réchauffement climatique selon les espèces. *Académie d'Agriculture de France*, 5 mai 2010. 15 p.
- Ganry, F. 1998. La valorisation agricole des fumiers et des composts en Afrique soudano-sahélienne Diagnostic et perspectives. *Agriculture et développement* **18** : 73–80.
- Garnett, T., Appleby, M. C., Balmford, A., Bateman, I. J., Benton, T. G., Bloomer, P., Burlingame, B., Dawkins, M., Dolan, L., Fraser, D., Herrero, M., Hoffmann, I., Smith, P., Thornton, P. K., Toulmin, C., Vermeulen, S. J. Godfray, H. C. J. 2013. Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies. *Science* **341** : 33–34.
- Garritty, D. P., Akinnifesi, F. K., Ajayi, O. C., Weldesemayat, S. G., Mowo, J. G., Kalinganire, A., Larwanou, M. Bayala, J. 2010. Evergreen Agriculture: a robust approach to sustainable food security in Africa. *Food Security* **2** : 197–214.

- Gautier, D., Ankogui-Mpoko, G.-F., Réounodji, F., Njoya, A. Seignobos, C. 2005. Agriculteurs et éleveurs des savanes d'Afrique centrale : de la coexistence à l'intégration territoriale, Abstract. *L'Espace géographique* tome **34** : 223–236.
- Gerber, P. ., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. Tempio, G. 2013. *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. 139 p
- Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Falcucci A., Tempio G., 2014. Lutter contre le changement climatique grâce à l'élevage – Une évaluation des émissions et des opportunités d'atténuation au niveau mondial. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Rome, 128p.
- Gliessman, S. . 2005. *Agroecology and agroecosystems*. (Earthscan). Pretty, London, UK. 405 pp.
- Gliessman, S. R. 1990. Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture. pp. 3–10 in Gliessman, S. R. (ed.). *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*. Springer New York, USA.
- Gohin, A. Chantret, F. 2009. The long-run impact of energy prices on world agricultural markets: The role of macro-economic linkages. *Energy Policy*. Beijing, China, Pp. 333–339
- Gomes, L. C., Pailleux, J. Y., Dedieu, B. Cournot. 2014. Diversity of goats livestock systems in Livradois-Forez/FR and forms of ecological intensification, *In Forage resources and ecosystem services provided by Mountain and Mediterranean grasslands and rangelands*. P. 5 *Conference Paper · June 2014*. 671-675.
- Gosse, G., Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M., Allirand, J.-M. Lemaire, G. 1986. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie* **6** : 47–56.
- Griffon, M. 2006. *Nourrir la planète*. Odile Jacob. 464p.
- Griffon, M. 2007. Pour des agricultures écologiquement intensives, des territoires à haute valeur environnementale et de nouvelles politiques agricoles : leçon inaugurale 2007. Eds de l'Aube. 143p.
- Griffon M., 2010. Pour des agricultures écologiquement intensives. La Tour d'Aigues, Editions de l'Aube, 112 p.
- Griffon, M. 2013. *Qu'est-ce qu'une agriculture écologiquement intensive ?* Editions Quae, Paris, France. 227 p.
- Griffon, M. 2014. L'agroécologie, un nouvel horizon pour l'agriculture | Cairn.info. *Etudes* **12** : 31–39.
- Grimm, V. Wissel, C. 1997. Babel, or the ecological stability discussions: an inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. *Oecologia* **109** : 323–334.
- Groot, J. C. J., Rossing, W. A. H., Lantinga, E. A. Van Keulen, H. 2003. Exploring the potential for improved internal nutrient cycling in dairy farming systems, using an eco-mathematical model. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* **51** : 165–194.
- Guéguen, L. Pascal, G. 2010. Le point sur la valeur nutritionnelle et sanitaire des aliments issus de l'agriculture biologique. *Cahiers de Nutrition et de Diététique* **45** : 130–143.
- Guo, Y. 2001. *Integrated Agriculture-aquaculture: A Primer* (FAO Fisheries Technical Paper). FAO, Rome, Italy. pp 148.
- Hamon, R. 1972. L'habitat des animaux et la production d'un fumier de qualité en zone tropicale sèche (bilan de trois années d'études). *L'Agronomie Tropicale. Série 2, Agronomie Générale. Etudes Techniques* **27** : 592–607.
- Hannon, B. 1973. The structure of Ecosystems. *Journal of Theoretical Biology* **41**: 535–546.
- Havard, M., LE Thiec, G. Vall, E. 1998. Stock numbers and use of animal traction in Sub-Saharan French-speaking Africa. *AMA. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, **29** : 9–14.

- Havard, M., Fall, A. Njoya, A. 2004. La traction animale au cœur des stratégies des exploitations agricoles familiales en Afrique subsaharienne. *Revue Élevage Médecine Vétérinaire Pays Tropicaux*, **57** (3-4) : 183-190.
- Havard, M. Side, C. S. 2016. Les dynamiques de mécanisation de la production et de la transformation agricole en Afrique de l'Ouest. UPGC, Korhogo, Côte d'Ivoire. 12p.
- Heinberg, R. Bomford, M. 2009. The food and farming transition: toward a post carbon food system. Sebastopol, ca, post carbon institute, 41p.
- Hénin, S. 1967. Les acquisitions techniques en production végétale et leur application. *Économie rurale* **74** : 37–44.
- Herrero M., Thornton P.K., Notenbaert A.M., Wood S., Msangi S., Freeman H.A., Bossio D., Dixon J., Peters M., van de Steeg J., Lynam J., Rao P.P., Macmillan S., Gerard B., McDermott J., Sere C., Rosegrant M., 2010. Smart Investments in Sustainable Food Production: Revisiting Mixed Crop-Livestock Systems. *Science* **327**, 822–825. doi:10.1126/science.1183725
- Herring, H. 2006. Energy efficiency—a critical view. *Energy* **31**:10–20.
- Hirata, H. Ulanowicz, R. E. 1984. Information theoretical analysis of ecological networks. *International journal of systems science* **15** : 261–270.
- Holling, C. S. 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* **4** : 1–23.
- Hostiou, N. Dedieu, B. 2009. Diversity of forage system work and adoption of intensive techniques in dairy cattle farms of Amazonia. *Agronomy for Sustainable Development* **29** : 535–544.
- Hulse, J. H. 2008. *Développement durable: un avenir incertain : avons-nous oublié les leçons du passé? L'Harmattan*. Quebec, Canada. 393 p.
- Inra et Cirad. 2009. Agriculture et alimentations du monde en 2050, scénarios et défis pour un développement durable. 2e édition décembre 2009, Note de synthèse. 34 p.
- INSD. 2007. *Recensement Général de la Population et de l'habitat-1996. Fichiers des villages du Burkina Faso*. 315 p.
- Kagoné, H. 2001. *Profil fourrager*. Burkina Faso, FAO. 23 p.
- Kim, G. R. 2009. Analysis of Global Food Market and Food-Energy Price Links - Based on System Dynamics Approach. 18 p.
- Klein H.D., Rippstein G., Huguenin J., Toutain B., Guerin H., Louppe D., 2014. Les cultures fourragères. Versailles : Ed. Quae, CTA, Presses agronomiques de Gembloux, 262 p.
- Knezek, B. D., Hesterman, O. B. Wink, L. 1988. Exploring a new vision of agriculture. In *National Forum* **68** (3) : 10. Honor Society of Phi Kappa Phi.
- Koulibaly, B., Traoré, O., Dakuo, D., Zombré, P. N. Bondé, D. 2010. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les rendements et les bilans culturaux d'une rotation cotonnier-maïs-sorgho au Burkina Faso. *Tropicicultura*, **28** : 184–189.
- Koutou, M., Sangaré, M. L., Havard, M., Toillier, A., Lacina, S., Thombiano, T. Davo, S. V. 2016. Sources de revenus et besoins d'accompagnement des exploitations agricoles familiales en zone cotonnière ouest du Burkina Faso. *Biotechnology Agronomy Society and Environment*. **20** : 42–56.
- Koutou, M., Sangaré, M., Havard, M., Vall, E., Sanogo, L., Thombiano, T. et Vodouhé, S. D. 2017. Adaptation des pratiques d'élevage des producteurs de l'Ouest du Burkina Faso face aux contraintes foncières et sanitaires. *Agronomie Africaine* **28** : 13–24.
- Lalande, R., Gagnon, B., Simard, R. R. Côté, D. 2000. Soil microbial biomass and enzyme activity following liquid hog manure application in a long-term field trial. *Canadian Journal of Soil Science* **80** : 263–269.
- Lamine, C. Bellon, S. 2009. *Transitions vers l'agriculture biologique : pratiques et accompagnements pour des systèmes innovants*. Educagri Editions. 318 p.

- Lamine, C. 2012. « Changer de système » : une analyse des transitions vers l'agriculture biologique à l'échelle des systèmes agro-alimentaires territoriaux. *Terrains et travaux* (1) :139–156.
- Landais, E. 1985. Population, élevage bovin et agriculture : aspect de l'évolution récente de l'occupation et de la gestion de l'espace rural dans les systèmes agro-pastoraux du nord de la Côte d'Ivoire. *Cahiers de la Recherche-Développement* n°7, 10 p.
- Landais E., Lhoste P. 1990. L'association agriculture-élevage en Afrique intertropicale : un mythe techniciste confronté aux réalités du terrain. *Cahiers des Sciences Humaines*, **26** (1-2) : 217-235.
- Landais E., Lhoste P., Guérin H., 1993. Les systèmes de gestion de la fumure animale et leur insertion dans les relations entre l'élevage et l'agriculture. *Cahiers Agricultures*, **2** : 9-25.
- Latham, L. G. Scully, E. P. 2002. Quantifying constraint to assess development in ecological networks. *Ecological Modelling* **154** : 25–44.
- Lavorel, V. Boulet, A. 2010. L'Agriculture Ecologiquement Intensive : un nouveau cap. *Août-Septembre 2010*, **170** : 22–29.
- Le Thiec, G. 1996. *Agriculture africaine et traction animale* (CIRAD). Montpellier, France. 355 pp.
- Lemaire, G. 2014. L'intégration Agriculture-Elevage, un enjeu mondial pour concilier production agricole et environnement. *Innovations Agronomiques* **39** : 181–190.
- Leontief, W. W. 1936. Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States. *The Review of Economics and Statistics* **18** : 105–125.
- Chabert, A. 1953. Leontief (W.W.). The Structure of the American Economy, 1919-1939 : An Empirical Application of Equilibrium Analysis. *Revue économique*, **4**(1): 124-125.
- Lhoste, P. 1987. *L'association agriculture-élevage : évolution du système agro-pastoral au Sine-Saloum (Sénégal)*, Études et synthèses de l'IEMVT. 314 p.
- Lhoste, P. 2004a. La traction animale en Afrique subsaharienne : histoire et nouveaux enjeux. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des pays Tropicaux* **57** (3-4) : 125-131
- Lhoste P., 2004b. Les relations agriculture-élevage. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides* **11** : 253-255.
- Lhoste P., Havard M., Vall E.. 2010. La traction animale. Versailles : Ed. Quae, CTA, 223 p.
- Little, D. C. Edwards, P. 2005a. Systèmes agricoles intégrés bétail-poisson. FAO, Rome, Italy. 216 p.
- Little, D. C. Edwards, P. 2005b. *Integrated livestock-fish agricultural systems*. Integrated livestock-fish agricultural systems. FAO, Rome, Italy. 22 p.
- Macarthur, R. 1955. Fluctuations of Animal Populations and a Measure of Community Stability. *Ecology* **36** : 533–536.
- Malam A. S., Issa, S., Mani, M. Sawadogo, G. J. 2016. Diversité des pratiques d'intégration agriculture – élevage dans les exploitations familiales du sud de la région de Maradi (Niger) et perspectives. *Agronomie Africaine*, **28** : 70–80.
- Malézieux, E. 2012. Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development* **32** : 15–29.
- Margat, J. 2005. Quels indicateurs pertinents de la pénurie d'eau ? *Géocarrefour* **80** (4) : 261-262.
- Masse, D., Chotte, J. ., Scopel, E. et (Coord). 2015. *L'ingénierie écologique pour une agriculture durable dans les zones arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest*. Agropolis International, CSFD Montpellier, France. 60 p.
- Matson, P. A. 1997. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science* **277** : 504–509.
- Mcneely, J. A., Harvest, F. Scherr, S. J. 2003. *Ecoagriculture: Strategies to Feed the World and Save Wild Biodiversity*. Island Press. 356 p.
- Meaux, S., Jouve, P. Maiga, A. 2004. Aménagement hydraulique et conflits agropastoraux : Analyse spatio-temporelle en zone Office du Niger (Mali). *Cahiers Agricultures*, **13** : 495-503.

- Mémento Agronome. 1991. Techniques rurales en Afrique (Quatrième édition). Ministère de la coopération et du développement, Paris, France. 1633 p.
- Meynard, J.-M. et Girardin, P. 1991. Produire autrement. *Courrier de la Cellule Environnement* **15** (15) : 1–19.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2014. Enquête sur les Pratiques culturelles 2011, Principaux résultats. Agreste, les dossiers, n°21, juillet 2014, 70p.
- Mollison, B. 1990. Permaculture; a practical guide for a sustainable future. Washington, DC : Island Press. 579p.
- Moraine, M., Therond, O., Leterme, P. Duru, M. 2012. Un cadre conceptuel pour l'intégration agroécologique de systèmes combinant culture et élevage. *Innovations Agronomiques* **22** : 101–115.
- Morvan, T., Nicolardot, B. Péan, L. 2006. Biochemical composition and kinetics of C and N mineralization of animal wastes: a typological approach. *Biology and fertility of soils* **42** : 513–522.
- Muchagata, M. et Brown, K. 2003. Cows, colonists and trees: rethinking cattle and environmental degradation. *Brazilian Amazonia. Agricultural Systems* **76** : 797-816.
- Nana, P. D., Andrieu, N., Zerbo, I., Ouédraogo, Y. et Gal, P.-Y. L. 2015. Agriculture de conservation et performances des exploitations agricoles en Afrique de l'Ouest. *Cahiers Agricultures* **24** (2): 113-122.
- Nations Unies. 2014. Situation de la population mondiale en 2014. Rapport concis. 48p.
- Nianogo A.J., Somda J., 1999. Diversification et intégration inter-spécifique dans les élevages ruraux au Burkina Faso. *Biotechnology Agronomy Society and Environment* **3** : 133–139.
- Niehof A., 2004. The significance of diversification for rural livelihood systems, *Food Policy* **29** : 321–338.
- OCDE. 2016. Agriculture et changement climatique : vers des systèmes agricoles durables, productifs et respectueux du climat. Document de référence. Note d'information 4. 2p.
- Odum, E. P. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* **164** : 262–270.
- Okike, I., Jabbar, M. A., Manyong, V. M. Smith, J. W. 2005. Ecological and socio-economic factors affecting agricultural intensification in the West African Savannas: evidence from Northern Nigeria. *Journal of sustainable agriculture* **27** : 5–37.
- Ouedraogo, M. Ripama, T. 2009. Analyse des résultats définitifs : Etat et structure de la population. Recensement général de la population et de l'habitation (RGPH) de 2006, Burkina Faso, 181p.
- Ouedraogo, S., Vall, E., Bandagao, A., Blanchard, M., Ba, A., Dabire, D. Saba, F. 2016. Sustainable Intensification of Mixed Farming Systems in Sub-humid Savannah of Western Africa in Relation to Local Value Chains (maize, cattle, small ruminants, cotton...). INERA-CIRAD, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 57 P.
- Pachauri, R. K., Reisinger, A. et autres. 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. GIEC. 103p.
- Paillard, S., Dorin, B. Treyer, S. 2010. *Agrimonde: Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*. Editions Quae. 298 p.
- Paré, L. Tallet, B. 1999. D'un espace ouvert à un espace saturé. Dynamique foncière et démographique dans le département de Kouka (Burkina Faso). *Espace Populations Sociétés* **17** : 83–92.
- Patten, B. C. 1978. Systems Approach to the Concept of Environment. *Ohio Journal of science* **78**:206-222.
- Patterson, M. 1996. What is Energy Efficiency Concepts, Indicators and Methodological Issues. *Energy policy*, **24** (5), 377-390.
- Paull, J. 2011. Attending the First Organic Agriculture Course: Rudolf Steiner's Agriculture Course at Koberwitz, 1924. *European Journal of Social Sciences* **21** (1):64-70.

- Pellegrini, P. Fernández, R. J. 2018. Crop intensification, land use, and on-farm energy-use efficiency during the worldwide spread of the green revolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **115** : 2335–2340.
- Peltre, C., Christensen, B. T., Dragon, S., Icard, C., Kätterer, T. Houot, S. 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry* **52** : 49–60.
- Penot, E., Benz, H. Bar, M. 2014. Utilisation d'indicateurs économiques pertinents pour l'évaluation des systèmes de production agricoles en termes de résilience, vulnérabilité et durabilité : le cas de la région du lac Alaotra à Madagascar. *Éthique et économique*, **11** (1) : 44-61.
- Perret, B. 2011. Pour une raison écologique. *Nachhaltigkeit Oktober 2011*, 17-19.
- Pesson, P. 1978. Stabilité, diversité et maturité des écosystèmes: notions applicables aux sociétés humaines. *Économie rurale* **127** : 4–6.
- Peterson, G., Allen, C. R. Holling, C. S. 1998. Original Articles: Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale. *Ecosystems* **1** :6–18.
- Petit, M. 2011. *Pour une agriculture mondiale productive et durable*. Éditions Quae.
- Peyraud, J.-L., Delaby, L., Dourmad, J. ., Faverdin, P., Morvan, T. Vertes, F. 2012. Les systèmes de polyculture-élevage pour bien valoriser l'azote. *Innovations Agronomiques* ? :45–69.
- Pieri, C. 1989. *Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. CIRAD-IRAT.
- Pimm, S. L. 1984. The complexity and stability of ecosystems. *Nature* **307** : 321–326.
- Pingali, P., Bigot, Y. Binswanger, H. P. 1983. *Agricultural Mechanization and the Evolution of Farming Systems in Sub-Sahara Africa*. World Bank Publication. The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London. 230p.
- Pingali, P. L. 1993. *Crop-livestock systems for tomorrow's Asia: From integration to Specialization* (IRRI, Los Banos, The Philippines.). Proc. Int. Workshop on Crop–Livestock Interactions, Khon Kaen, Thailand. 27 Sept.–1 Oct. 1993
- Pingali, P. 2007. Westernization of Asian diets and the transformation of food systems: implications for research and policy. *Food policy* **32** : 281–298.
- Powell, J. M., Williams, T. O. 1995. An overview of mixed farming systems in sub-Saharan Africa. In *International Conference on Livestock and Sustainable Nutrient Cycling in Mixed Farming Systems of Sub-Saharan Africa*, Addis Ababa (Ethiopia), 22-26 Nov 1993. ILCA.
- Powell, J. M., Fernández-Rivera, S., Hiernaux, P. Turner, M. D. 1996. Nutrient cycling in integrated rangeland/cropland systems of the Sahel. *Agricultural Systems* **52** :143–170.
- Powell, J. M., Pearson, R. A. Hiernaux, P. H. 2004. Crop–Livestock Interactions in the West African Drylands. *Agronomy Journal* **96**: 469–483.
- 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
- Reijntjes, C., Haverkort, B. Waters, B. 1992. *Farming for the future: an introduction to low-external-input and sustainable agriculture*. Macmillan. ILEIA, PO, Box, 64, NL-3830, AB, Leusden, Netherlands. 466p.
- Roussel, I. 2013. La qualité de l'air et ses enjeux. *Pollution atmosphérique*. N° 220 - octobre-décembre 2013. 17 p.
- Rufino M.C., Hengsdijk H., Verhagen A., 2009a. Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **84**, 229–247.
- Rufino M.C., Tiftonnell 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. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **85** (2) 169–186.
- Russell, D., Deguine, J.-P. Ferron, P. 2008. *Protection des cultures : De l'agrochimie à l'agroécologie*. Editions Quae. 194 p.
- Rutledge, R. W., Basore, B. L. Mulholland, R. J. 1976. Ecological stability: An information theory viewpoint. *Journal of Theoretical Biology* **57**: 355–371.
- Ryschawy, J., Joannon, A. Gibon, A. 2014. L'exploitation de polyculture-élevage : définitions et questions de recherche. Une revue. *Cahiers Agricultures* **23** : 346–356.
- Ryschawy, J., Benoit, M., Hostiou, N. Delfosse, C. 2017. *Quelles concurrences et synergies entre cultures et élevage dans les territoires de polyculture-élevage ?* In *INRA Productions Animales* 04/17, **30** (4), 363-380. Editions Quae. 156 p.
- Saleem, M. M. 1998. Nutrient balance patterns in African livestock systems. *Agriculture, ecosystems et environment* **71** : 241–254.
- Schaller, N. 2013. L'agroécologie : des définitions variées, des principes communs. *Centre d'études et de prospective*, **59** : 1-4.
- 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. *Ecological Modelling* **247** : 144–156.
- Schiere, H. Kater, L. 2001. Mixed crop-livestock farming: a review of traditional technologies based on literature and field experience. (FAO Animal Production and Health. Papers 152. FAO, Rom, Italy.
- Schiere, J. B., Ibrahim, M. N. M. Van Keulen, H. 2002. The role of livestock for sustainability in mixed farming: criteria and scenario studies under varying resource allocation. *Agriculture, ecosystems et environment* **90** : 139–153.
- Schleich, K. 1986. Le fumier peut-il remplacer la jachère ? Possibilité d'utilisation du fumier : exemple de la savane d'Afrique occidentale. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des pays Tropicaux* **39** : 97–102.
- Schmidhuber, J. Tubiello, F. N. 2007. Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104** : 19703–19708.
- Seguin, B. 2003. Adaptation des systèmes de production agricole au changement climatique. *Comptes Rendus Geoscience* **335** : 569–575.
- Sempore, A. W., Andrieu, N., Bayala, I. Sankara, E. 2009. Evaluation de l'intérêt d'un modèle de simulation du fonctionnement de l'exploitation comme outil d'évaluation d'innovations : cas de l'embouche bovine, In « Evaluation des impacts des innovations dans les systèmes de production et les territoires agropastoraux d'Afrique de l'Ouest : quelles méthodes, quels indicateurs ? », 1-4 décembre 2009, Ouagadougou, Burkina Faso. Cirad, Montpellier, France. 12p.
- Semporé, A. 2013. Quelles stratégies pour améliorer l'intégration agriculture-élevage dans des exploitations de savane ouest-africaine ? Approches par simulation avec les producteurs. *1st conference of African research on agriculture, food, and nutrition*. Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, June 4-6, 2013. *Agriculture and the challenges of food and nutrition in Africa: the contributions of research in the cotton zone*. AGRA, Yamoussokro, Côte d'Ivoire. 20 p.
- Semporé A. W., 2015. Rôle de la modélisation dans l'aide à la conception de systèmes de production innovants : le cas des exploitations de polyculture-élevage à l'Ouest du Burkina Faso. Thèse de doctorat Science du Sol, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 101 p.
- Sempore, A. W., Andrieu, N., Le Gal, P. Y., Nacro, H. B. Sedogo, M. P. 2015. Supporting Better Crop-Livestock Integration on Small-Scale West African Farms: A Simulation-Based Approach. *Agroecology and Sustainable Food Systems* **40** : 3–23.
- Séré, C. Steinfeld, H. 1995. World Livestock Production System. Current Status, Issues and Trends. FAO. Animal Production and Health Paper 127 : 58 p.

- Serpantié, G. Ouattara, B. 2001. La jachère en Afrique tropicale- Ch. Floret, R. Pontanier, Paris. pp : 21-83.
- Sib, O., Bougouma-Yameogo, V. M. C., Blanchard, M., Gonzalez-Garcia, E. Vall, E. 2018. Production laitière à l'ouest du Burkina Faso dans un contexte d'émergence de laiteries : diversité des pratiques d'élevage et propositions d'amélioration. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des pays Tropicaux* **70** (3): 81-91.
- Simelton, S. E., Catacutan, C. D., Dao, T. C., Dam, B. V. Le, T. D. 2017. Factors constraining and enabling agroforestry adoption in Viet Nam: a multi-level policy analysis. *Agroforestry Systems* **91** : 51–67.
- Sims R.E., 2011. Energy-smart food for people and climate. Issue Paper. FAO, Italy, Rome. 66p
- Smaling, E. M. A. Dixon, J. 2006. Adding a soil fertility dimension to the global farming systems approach, with cases from Africa. *Agriculture, ecosystems et environment* **116** : 15–26.
- 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 on Agriculture*, **26** : 237–246.
- Soussana, J. F. 2012. Chapitre 8 Changement climatique et sécurité alimentaire : un test crucial pour l'humanité ? In Jacquet P., Pachauri R. K., Tubiana Laurence (dir.). Regards sur la Terre 2012. Développement, alimentation, environnement : changer l'agriculture ? Armand Colin Editions, Paris. pp 233–242.
- Stark, F., Fanchone, A., Semjen, I., Moulin, C.-H. Archimède, H. 2016. Crop-livestock integration, from single practice to global functioning in the tropics: Case studies in Guadeloupe. *European Journal of Agronomy* **80** : 9–20.
- Stark, F., González-García, E., Navegantes, L., Miranda, T., Pocard-Chapuis, R., Archimède, H. Moulin, C.-H. 2018. Crop-livestock integration determines the agroecological performance of mixed farming systems in Latino-Caribbean farms. *Agronomy for Sustainable Development* **38** (4). 11p.
- Stassart, P. M., Barrett P.H., Grégoire J-CL, Hance Th., Mormont M., Reheul D., Stilmant D., Vanloqueren G., Visser M., 2012. L'agroécologie : trajectoire et potentiel Pour une transition vers des systèmes alimentaires durables. In Agroécologie entre pratiques et sciences sociales Van Dam D., Nizet J., Streith M., Stassart P. M. 21 p.
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C., 2006. Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options. FAO. Rome, Italy. 377 p.
- Swaminathan, M. S. 1996. *Sustainable agriculture towards an evergreen revolution*. Konark publishers, Dehli, India. 219p.
- Szyrmer, J. Ulanowicz, R. E. 1987. Total flows in ecosystems. *Ecological Modelling* **35** : 123–136.
- Thomas, M., Fortun-Lamothe, L., Jouven, M., Tichit, M. González-García, E. 2014. Agro-écologie et écologie industrielle : deux alternatives complémentaires pour les systèmes d'élevage de demain, *INRA Production Animale*, **27** (2), 89-100.
- Thompson, H. M. 2010. Risk assessment for honey bees and pesticides-recent developments and 'new issues'. *Pest Management Science* **66** : 1157–1162.
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M. Challinor, A. J. 2014. Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global Change Biology* **20** : 3313–3328.
- Tiffen, M. 2004. Population pressure, migration and urbanisation: Impacts on crop–livestock systems development in West Africa. in: Sustainable Crop-Livestock Production for Improved Livelihoods and Natural Resource Management in West Africa. Proceedings of an International Conference Held at the International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria. pp. 3–27.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* **418** : 671–677.
- Tingueri L. B., 2015. Comprendre et caractériser les pratiques hors-normes de gestion de la fumure organique dans l'ouest du Burkina Faso : évaluer la durabilité des systèmes de production les mettant en œuvre. DEA GIRN, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 85p.

- Tingueri, L. B., Bougouma Yameogo, V. Blanchard, M. 2017. Évaluation de la durabilité des pratiques hors-normes de gestion de la fumure organique dans l'Ouest du Burkina Faso. Communication avec actes. In : Dynamiques et durabilité des zones cotonnières africaines. Recueil résumés. APCAM, IER, CIRAD, CNRA. Bamako : APCAM, Résumé, p. 24. Colloque international sur les dynamiques et durabilité des zones cotonnières africaines, Bamako, Mali, 21 Novembre 2017/24 Novembre 2017.
- Tissot, B. 2001. Quel avenir pour les combustibles fossiles ? Les avancées scientifiques et technologiques permettront-elles la poursuite d'un développement soutenable avec les énergies carbonées ? *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* **333** : 787–796.
- Tittonell, P., Scopel, E., Andrieu, N., Posthumus, H., Mapfumo, P., Corbeels, M., Van Halsema, G. E., Lahmar, R., Lugandu, S., Rakotoarisoa, J., Mtambanengwe, F., Pound, B., Chikowo, R., Naudin, K., Triomphe, B. Mkomwa, S. 2012. Agroecology-based aggradation-conservation agriculture (ABACO): Targeting innovations to combat soil degradation and food insecurity in semi-arid Africa. *Field Crops Research* **132** : 168–174.
- Tittonell, P. 2014. Ecological intensification of agriculture—sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **8** : 53–61.
- Trabelsi, M. 2017. Comment mesurer la performance agro écologique d'une exploitation agricole pour l'accompagner dans son processus de transition ? Géographie, Université Paul Valéry. Montpellier, France. 354 p.
- 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). *Sécheresse* **24**:115–128.
- Treyer, S. 2006. A quelle raréfaction de l'eau faut-il se préparer ? Construire une intervention prospective au service de la planification pour les ressources en eau en Tunisie. Thèse de doctorat, ENGREF, AgroParisTech, 670p.
- Ulanowicz, R. E. 2001. Information theory in ecology. *Computers et chemistry* **25** : 393–399.
- Ulanowicz, R. E. 2004. Quantitative methods for ecological network analysis. *Computational Biology and Chemistry* **28** : 321–339.
- Ulanowicz, R. E. 2011a. Quantitative Methods for Ecological Network Analysis and Its Application to Coastal Ecosystems. *Treatise on Estuarine and Coastal Science* **9** : 35–57.
- Ulanowicz, R. E. 2011b. Towards Quantifying a Wider Reality: Shannon Exonerata. *Information* **2** : 624–634.
- Ulanowicz, R. E., Goerner, S. J., Lietaer, B. Gomez, R. 2009. Quantifying sustainability: Resilience, efficiency and the return of information theory. *Ecological Complexity* **6** : 27–36.
- Unesco. 1993. La Conférence de la biosphère, 25 ans après. Paris, France. 34 p.
- United Nations. 2015. *World population prospects. The 2015 Revision. Key Findings and Advance Tables*). 241 p.
- Vall E., Lhoste P., Abakar O., Dongmo Ngoutsop A.L., 2003. La traction animale dans le contexte en mutation de l'Afrique subsaharienne : enjeux de développement et de recherche. *Cahiers Agricultures*, **12** (4) : 219-226
- Vall, E., Dongmo, N. A. L., Ndao, T. Iboudo, I. 2004. Evolution des pratiques de traction animale et conséquences sur la durabilité des systèmes de culture. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des pays Tropicaux* **57** : 145–155.
- Vall E., Dugué, P., Blanchard, M., 2006a. Le tissage des relations agriculture-élevage au fil du coton. *Cahiers Agricultures*, **15**: 72–79.
- Vall, E., Diallo, M., Blanchard, M., César, J. Chapuis/Poccard, R. 2006b. Situation et dynamique agropastorale des villages de Koumbia et Waly (Burkina Faso) : diversité et pratiques. Projet DCG2-50 de Duras. Septembre 2006. 50 p.

- Vall, E. Bayala, I. 2007. Compte rendu : traction animale technique. Projet Teria. Décembre 2007. 41 p.
- Vall, E. 2009. Diversité, pratiques agropastorales, relations d'échanges et de conflits, productivité et sécurité alimentaire dans les exploitations agropastorales de la province du Tuy (Burkina Faso). Centre International de Recherche-Développement sur l'Élevage en Zone sub-humide, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 53 p.
- Vall E., Diallo M.A., 2009. Savoirs techniques locaux et pratiques : la conduite des troupeaux aux pâturages (Ouest du Burkina Faso). *Natures Sciences Sociétés*, **17**, 122-135.
- Vall, E., Blanchard, M., Diallo, M. A., Dongmo, A. L. Bayala, I. 2010. Savoirs techniques locaux, sources d'innovations ? Production de savoirs actionnables dans une démarche de recherche action en partenariat. 14 p In Seiny-Boukar L., Boumard P., (éditeurs scientifiques), 2010. Actes du colloque « Savanes africaines en développement : innover pour durer », 20-23 avril 2009, Garoua, Cameroun. Prasac, N'Djaména, Tchad ; Cirad, Montpellier, France, cédérom.
- Vall E., Koutou, M., Blanchard, M., Coulibaly, K., Diallo, A.M., Andrieu, N., 2011. Intégration agriculture-élevage et intensification écologique dans les systèmes agrosylvopastoraux de l'Ouest du Burkina Faso, province du Tuy. In Partenariat, modélisation, expérimentations : quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique ? Cirad, 13p.
- Vall, E., Blanchard, M., Diallo, M. A. Lecomte, P. 2012. L'innovation par simplification expliquée par le principe de moindre quantité d'action de Maupertuis : cas de l'intégration agriculture-élevage en Afrique soudano-sahélienne. *Rencontres Recherche Ruminants* **19** : 401-404.
- Vall, E. Chia, E. 2014. Co-construire l'innovation : la recherche-action en partenariat. *Agricultures familiales et mondes à venir*. Sourrisseau JM (Ed). Quae Editions Paris : 239–256.
- Vall, E., Dongmo, A. L., Abakar, O. Meyer, C. 2002. La traction animale dans le nouveau contexte des savanes cotonnières du Tchad, du Cameroun et de la République centrafricaine I. Diffusion de la traction animale et sa place dans les exploitations. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des pays Tropicaux* **55** : 117–128.
- Vall, E., Marre-Cast, L. Kamgang, H. J. 2017. Chemins d'intensification et durabilité des exploitations de polyculture-élevage en Afrique subsaharienne : contribution de l'association agriculture-élevage. *Cahiers Agricultures* **26** (2): 25006. 12p.
- Vigne M., 2012. Flux d'énergie dans des systèmes d'élevage laitiers contrastés : élaboration d'indicateurs et analyse de la diversité inter et intra-territoire. Thèse de doctorat, Vie Agro Santé. Rennes, Agrocampus Ouest, France, 269 p.
- Vigne, M., Vayssières, J., Lecomte, P. Peyraud, J.-L. 2013. Pluri-energy analysis of livestock systems – A comparison of dairy systems in different territories. ScienceDirect. *Journal of environmental management* **126** : 44–54.
- Vigne M., Bénagabou I., Faverdin Ph., Coulibaly D., Ba A., Vall E., Kanwe A., Blanchard M., 2014. Evaluation de l'efficacité énergétique fossile des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest : adaptations et perspectives méthodologiques. *INRA Productions Animales*, **27** (5) : 369-398.
- Vayssières J., Vigne M., Alary V., Lecomte P., 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agriculture Systems* **104**, 146–161.
- Vayssières J., Rufino M., 2012. Managing nutrient cycles in crop and livestock systems with green technologies. In: Green technologies in food production and processing. Boye J. I., Arcand Y. (eds.). New York : Springer New York, USA, 151-182.
- Villenave, É., Aymoz, G., Beekmann, M., Baeza-Squiban, A. Colosio, J. 2012. La pollution de l'air par les particules : des connaissances scientifiques au service des acteurs. *Pollution Atmosphérique - Numéro spécial - Novembre 2012*. 7 p.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D. David, C. 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **29** : 503–515.
- Yang, H., Fang, Y. Xhonglin, C. 2003. *Systèmes cultureux intégrés graminés-poisson en Chine*. pp : 21-24. In FAO : Intégration agriculture-aquaculture. Principes de base et exemples. Document technique sur les pêches 407.

- Zahm, F. 2003. Méthodes de diagnostic des exploitations agricoles et indicateurs : panorama et cas particuliers appliqués à l'évaluation des pratiques phytosanitaires. *Ingénieries* N° 33 : 13-34.
- Zahm, F., Ugaglia, A. A., Boureau, H., Del'homme, B., Barbier, J. M., Gasselin, P., Gafsi, M., Guichard, L., Loyce, C., Manneville, V., Menet, A. Redlingshofer, B. 2015. Agriculture et exploitation agricole durables: état de l'art et proposition de définitions revisitées à l'aune des valeurs, des propriétés et des frontières de la durabilité en agriculture. *Innovations Agronomiques* **46** : 105–125.
- Ziadi, N., Gagnon, B. Athyna, C. 2007. Utilisation des engrais minéraux azotés en grandes cultures : description des différentes formes et leurs impacts en agroenvironnement. Colloque sur l'azote. CRAAQ-OAQ. 29 p.
- Zieseemer, J. 2007. *Energy use in organic food systems*. FAO, 28 p.
- Zoungrana/Ouédraogo, Z. Traoré, S. 2016. Le compostage en tas, Fiche technique innovation. UNPCB, CIRAD. 7 p.

WEBOGRAPHIE

- Anderson, C., Pimbert, M. Kis, C. 2015. Construire, défendre et renforcer l'agroécologie. Une lutte mondiale en faveur de la souveraineté alimentaire, 8 p.
<http://www.fao.org/family-farming/detail/fr/c/387449/> (consulté le 1^{er} septembre 2018)
- Banque mondiale, 2014. Base de données de la Banque Mondiale.
<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/AG.CON.FERT.ZS?view=chart>
- Bellarby, J. Foreid, B. 2008. Comment l'agriculture peut contribuer à la lutte aux changements climatiques. Greenpeace International. 10p.
http://reseauecoleetnature.org/system/files/agriculture-contribution-changements-climatiques-resume-fr_greenpeace.pdf (consulté le 8 août 2018)
- Benoit, G., Berlizot, T., Bortolotti, Serge, Brugière, Y., Domallain, D., Jourdir, G., Madignier, M.-L., Mailleau, C., Piaton, H., Pinçonnet, D., Renoult, R. Rocq, S. 2017. Eau, agriculture et changement climatique : Statu quo ou anticipation ? Synthèse et recommandations. Rapport n° 16072. 66 p.
http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/cgaaer_16072_2017_rapport.pdf (consulté le 7 août 2018)
- Berti, F. Lebailly, P. 2009. L'agriculture familiale africaine au cœur des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD), 15 p.
https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/65331/1/CEDIMES_AFA_Berti_Lebailly_publication.pdf (consulté le 11 août 2018)
- Dufumier, M. 2009. Agro-écologie, sécurité alimentaire et développement « durable » - Alternatives International. <http://www.alterinter.org/spip.php?article3360> (20 Aout 2018).
- Dugué P., Andrieu N., Blanchard M., Chia E., Havard M., Le Gal P.Y., Penot E., Salgado P., Vall E., 2013. Evolutions des relations agriculture élevage en zones de savane africaines et malgaches : quelques enseignements pour la polyculture élevage en France. Presented au Séminaire national d'échanges entre acteurs du développement et de la recherche « Les systèmes de polyculture-élevage dans les territoires », ACTA INRA, Toulouse (France), 15 p.
https://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 (2 février 2015)
- Inter-Réseau. 2011. L'agroécologie : où en est-on ? Inter-Réseaux développement rural et SOS Faim, Bulletin de synthèse souveraineté alimentaire, 8 p. www.inter-reseaux.org/ (2 septembre 2018)

IPCC. 2018. Global warming of 1.5°C. Special Report of Sixth Assessment Report (AR6), Products, Outline of the on 1.5°C.

https://www.ipcc.ch/pdf/session48/pr_181008_P48_spm_en.pdf (18 octobre 2018)

Reardon T., 1994. La diversification des revenus au sahel et ses liens éventuels avec la gestion des ressources naturelles par les agriculteurs. Présenté au séminaire CIRAD/FAO sur l'agriculture durable dans la zone soudano-sahélienne, Dakar, 11-14 janvier 1994 (présenté par Josué DIONE de la part de REARDON). 12p (16 février 2013).

<http://www.aec.msu.edu/fs2/scans/mali/misc%2094-02.pdf> (consulté le 16 février 2013)

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. AgroParisTech-Montpellier, France. 246 p. <http://prodinra.inra.fr/record/355944> (15 juin 2016)

Van Keulen, H. Schiere, J. B. 2004. Crop-livestock systems: old wine in new bottles. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, 26 Sep – 1 Oct 2004, Brisbane, Australia. Published on CDROM. 12 p. Web site [www.cropscience.org.au](http://www.cropsscience.org.au) (19 juillet février 2018)

ANNEXE

Intégration agriculture-élevage et efficacité énergétique des exploitations mixtes d'agriculture-élevage du Burkina Faso.

Crop-livestock integration and energy efficiency in farms of Burkina Faso ;

BÉNAGABOU O.I. (1), KANWE B.A. (1), VALL E. (2), VIGNE M. (3), BLANCHARD M. (2)

(1) CIRDES, Unité de Recherche sur les Productions Animales, BP : 454 Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

(2) CIRAD-CIRDES, UMR Selmet F-34 398 Montpellier, France ; (3) CIRAD, UR SCA, Bêlém, Brésil

INTRODUCTION

Les exploitations mixtes d'agriculture-élevage des savanes de l'Afrique de l'Ouest sont confrontées à d'importants changements qui entravent leur développement (réduction des espaces disponibles, augmentation du prix des intrants, volatilité des prix, aléa climatique...). Pour sécuriser la production, réduire les charges et améliorer leur autonomie vis-à-vis des intrants de synthèse (engrais, aliments) de plus en plus chers, les paysans ont développé différentes formes d'intégration de l'agriculture et de l'élevage (IAE). Les trois piliers de l'IAE sont la traction animale, la production de fumure organique, les cultures fourragères et le stockage des résidus de culture.

En outre, l'utilisation d'intrants de synthèse dont la production et le transport nécessitent des quantités importantes d'énergie fossile, contribue à la production de GES et à la dégradation de l'environnement. Certaines études ont permis d'établir un bilan énergétique des exploitations mixtes d'agriculture-élevage africains (Vigne *et al.*, 2011) mais n'ont pas établi de lien entre les pratiques d'IAE et ce bilan. Notre objectif est d'évaluer l'effet de l'IAE sur l'efficacité énergétique des exploitations agricoles.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. ÉCHANTILLON

L'étude a été réalisée par enquête sur 25 exploitations agropastorales (composées d'agriculteurs, d'éleveurs et d'agro-éleveurs ; Vall *et al.*, 2006) dans le village de Koumbia et 07 exploitations périurbaines productrices de lait dans les villes de Bobo-Dioulasso et de Ouagadougou au Burkina Faso (Hamadou *et al.*, 2002).

1.2. ANALYSE DE LA DIVERSITÉ ÉNERGÉTIQUE

Une typologie des exploitations a été réalisée en se basant sur un bilan complet des entrées directes et indirectes d'énergie fossile et des sorties d'énergie brute. Pour chaque exploitation, l'efficacité énergétique (EE) a été calculée.

$$EE = \frac{\text{Production d'énergie brute totale (MJ)}}{\text{consommation d'énergie fossile directe et indirecte (en MJ)}}$$

1.3. ÉVALUATION DE L'IAE

L'IAE a été évaluée à l'aide d'indicateurs partiels construits par référence aux trois piliers de l'intégration : la couverture des besoins en traction animale (CBTA), la couverture des besoins en fumure organique (CBFO) et la couverture des besoins fourragers (CBF). Ces indicateurs sont synthétisés en un indicateur global (IG).

$$CBFO (\%) = \frac{\text{Quantité totale de fumure organique épandue (kg)}}{2500 (\text{kg /ha}) * \text{surface cultivée (ha)}}$$

$$CBF (\%) = \frac{\text{Quantité totale de fourrage stockée (kg)}}{6,25 \text{ kgMS /UBT} / j * 365 * \text{Nombre UBT}}$$

$$CBTA (\%) = \frac{\text{Nombre de paire de boeufs disponibles}}{\text{Surface cultivée (ha)} / 5 (\text{ha /paire de boeufs})}$$

$$IG (\%) = \frac{CBTA + CBFO + CBF}{3}$$

Tableau 1. Caractéristiques de la diversité des exploitations agricoles et EE.

Types	Efficacité énergétique	Surface totale cultivée (ha)	Effectif du troupeau (UBT)	Entrées totales d'énergie (MJ/an)	Sorties totales d'énergie (MJ/an)
Agriculteurs	14,7 ± 4,8	8,0 ± 6,0	6,0 ± 6,1	18 739 ± 16 490	28 4575 ± 26 951
Éleveurs villageois	13,1 ± 3,4	4,1 ± 2,7	35,8 ± 14,0	21 565 ± 12 059	270 530 ± 124 417
Éleveurs périurbains	0,7 ± 0,4	10,1 ± 7,8	53,1 ± 22,7	303 537 ± 141 881	170 705 ± 77 571

Les exploitations ont été réparties en deux classes : « fort » ou « faible » niveau d'IAE.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

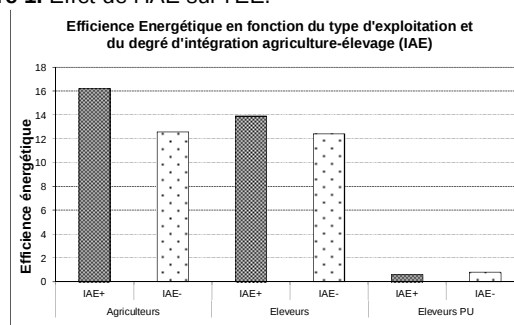
2.1. INÉGALITÉ DES EXPLOITATIONS FACE À L'EE

L'EE varie selon le type d'exploitation (tableau 1). Les exploitations traditionnelles (agriculteurs et éleveurs ruraux) présentent une meilleure EE que les exploitations modernes (éleveurs périurbains). La faible utilisation d'intrants de synthèse dans les exploitations traditionnelles explique en grande partie une EE élevée. Les exploitations modernes consomment beaucoup d'énergie fossile par l'intermédiaire des investissements en matériel, bâtiment et intrants d'élevage (produits vétérinaires, aliments...) et l'adoption des nouvelles technologies (insémination artificielle).

2.2. EFFET DE L'IAE SUR L'EE DES EXPLOITATIONS

Chez les agriculteurs et les éleveurs ruraux, l'IAE contribue à améliorer l'EE (respectivement 12,6 ± 5,0 et 12,4 ± 3,5 pour les niveaux d'IAE faible contre 16,2 ± 4,64 et 13,9 ± 3,2 pour les niveaux d'IAE fort). L'IAE permet de diminuer la consommation d'énergie fossile au sein de l'exploitation par une utilisation accrue de fumure organique et de fourrage en substitution aux engrais minéraux et aux aliments bétail. En revanche, chez les éleveurs périurbains, l'IAE est peu pratiquée et l'on n'observe pas de différence d'EE selon le niveau d'IAE (figure 1).

Figure 1. Effet de l'IAE sur l'EE.



CONCLUSION

L'IAE renforce ainsi l'autonomie énergétique des exploitations agricoles en réduisant les consommations d'énergie fossile directe et indirecte. Il serait intéressant d'analyser l'EE des exploitations en intégrant les différentes formes d'énergie utilisées (brute, physique, fossile, naturelle) et la diversité des flux d'énergie internes aux exploitations.

Vall, E., Dugué, P., Blanchard, M., 2006. Cah. Agri. 15, 72-79

Vigne, M., Ba, A., Coulibaly D., Dembélé, B., 2011. Renc.

Rech. Ruminants, 19, 161

Hamadou, S., Kamuanga, M., Marichatou H., Kanwé, B. A.,

Sidibé, A., Pare, J., 2002. CIRDES, 56

Crop-Livestock integration improves Energy Use Efficiency of smallholders mixed production systems - the case of western Burkina Faso

Bénagabou O. Ida^{1, 2, 3*}, Vayssières Jonathan², Blanchard Melanie^{1, 2}, Vigne Mathieu², Vall Eric², Bougouma Valérie³, Lecomte Philippe² & Nacro H. Bismark³

¹ CIRDES -URPAN ; ² CIRAD-UMR Selmet ; ³UPB, IDR ; * Bénagabou, O. Ida

1 Introduction

Increased food production to cover the growing population needs while limiting the impact on the environment is a major challenge faced by the global agricultural sector. In Sub-Saharan Africa mixed systems dominate. Crop Livestock Integration (CLI) interactions improvement is seen as a crucial mean to support production and strengthen the resilience of family households facing the economic and climate changes. Few quantitative studies demonstrate such potential. Indeed, based on three main biotechnical pillars: animal draft, manure production and crop residues piling, the integration enhance local renewable resources (material / energy) uses for production, including the cycling of coproducts as resources for another activity within the system (Lhoste, 1987), while limiting the use of external inputs. Recycling of matter / energy is regarded as an essential characteristic of the perenity of the ecosystem functioning (Allesina & Ulanowicz 2004). Upon a diversity of system type and mixed farming operations, the study analyzes the quantitative links between the level of biomass recycling, the autonomy, the degree of Integration and the gross energy use efficiency in order to identify biomass management practices that are alternative to the use of external inputs.

2 Material and Methods

The study has been deployed on eight family households in Koumbia (Western Burkina Faso). The panel covers the diversity of farms observed in the cotton zone including 3 cropping (A), 2 agro-pastoral (AE) and 3 pastoral breeding (E; Vall *et al.*, 2006) farms. At first, a farm model was conceptualized to detail the flows of biomass between the system and its environment (outflow and inflow of the close milieu and/or the external market) and the flow inventory between the system compartments (humans, cattle, manure piles, crops, fodder and feeds stocks; Figure 1). These flows were then converted into Gross Energy (GE) and expressed in megajoules (MJ) according to literature coefficients. An Ecological Network Analysis approach (ENA, Finn, 1980) was applied to the matrix of flows describing the ecological functioning of these agro-ecosystems to calculate indicators describing the degree of recycling (Finn Cycling Index, FCI), the degree of Integration (DCLI, Vayssières *et al.*, 2011), the recycling intensity (PL) and the autonomy of the farms (Aut). DCLI is here an adapted version of the indicator used by Vayssières *et al.* (2011). The gross energy efficiency (GEE) was also calculated from the GE productions reported to GE consumptions as well as other indicators describing integration practices such as the whole year amount of crop residues and fodder available per unit of cattle (FOD, expressed in kgDM.TLU-1.year-1) and the amount of available organic manure per hectare cultivated per year (OM / ha, expressed in kgDM.ha-1 .year-1).

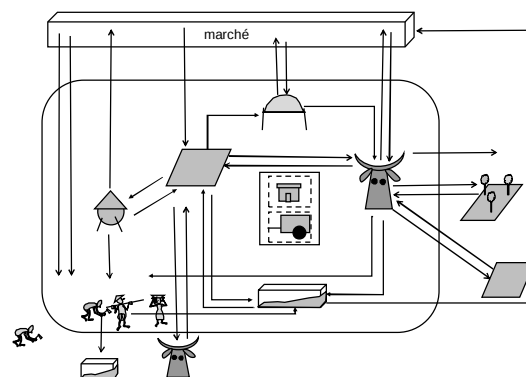


Fig. 1. Conceptual diagram of the farm

3 Results and discussion

Applying ENA first show low levels of recycling (3 < FCI < 30%) varying greatly within and between types (Table 1). This variability results from the diversity of practices CLI (straw, stalks, forage crops, manure, compost, park crumb, digester sludge) more or less implemented in the farms.

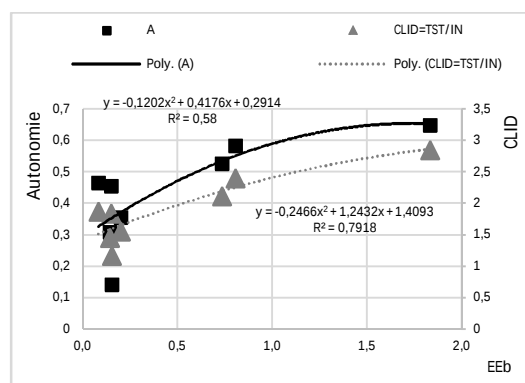


Fig. 2. Relations between the degree of integration (CLID), autonomy and gross energy efficiency

Table 1. Recycling and crop-livestock integration indicators on the farm

	FCI (%)	PL (SD)	DCLI= TST/IN (SD)	OM/ kgDM.ha ⁻¹ .year ⁻¹	FOD/kgD M.TLU-1.year ⁻¹	Animal chargin g	Autono my
A2	0,29	2,0	1,87	213	235	0,8	0,47
A3	0,14	2,9	2,40	564	473	0,6	0,58
A7	0,08	2,7	2,85	322	435	0,5	0,65
AE5	0,25	2,1	1,84	752	196	1,7	0,46
AE6	0,19	2,3	2,12	994	158	0,7	0,53
E1	0,11	1,5	1,45	315	97	8,5	0,31
E4	0,16	1,7	1,55	287	64	9,8	0,36
E8	0,03	1,2	1,16	124	0	35,9	0,14

The low to medium FCI observed on all farms indicates low energy transfer between the different activities (compartments) of the farm and low observed values for PL, ranging from 1.2 to 2.9, indicating that a unit of input barely flows through 3 of the 6 compartments of the holdings.

However, the higher values among crop and agro-pastoral farms compared to breeders show that the accumulation of gross energy in a compartment for direct use on site at breeders (eg, direct animal holding on fields).

The recycling of nitrogen evaluated along Network Analysis in Madagascar and Kenya (Alvarez et al, 2013; Rufino *et al.*, 2009) have similarly show a limited recycling in agro-ecosystems because of their traditional practices mainly the abandonment of a large amount of crop residues in the field that will be consumed by other herds reducing energy recycling opportunities on the farm.

Moreover, we observe that the synthetic indicator of integration (CLID), the both indicators describing the practices (OM/TLU and FOD/TLU) and the recycling intensity ranging respectively from 1.16 to 2.85; from 124 to 994 kg DM.TLU-1.year-1, 0 to 473 kgDM.TLU-1.year-1 and 1.2 to 2.9, are higher among crop and agro-pastoral farms than among breeders. This reflects the lower investment of the breeders in integrating the two activities. This lower or medium level of integration observed among breeders is due to their practices (eg, common land on their own fields instead of fodder storage, recommended by the CLI practices). Indeed, the large TLU number of these farms leads them to drive their animals on the surrounding rangelands to meet their forage needs, which reduces the potential collection / recycling of manure. Also, even though in absolute terms, they often store larger amounts of forage than the other two types, reported to the size of the herd, this represents small quantities. Finally, the energy flow incurred by integration represent less than 25% of the total energy flows into network among breeders, when they reach 33% on crop and agro pastoral farms.

Although the farms implement a diversity of practice for the storage of crop residues (straw, stalks, forage) and for production of OM from different techniques (improved park, manure pits, compost and bio-digesters), the integration still shows large margin of improvement in West Africa in general, and particularly in cotton zone, highlighted by this study in the village of Koumbia (Vall *et al.*, 2006; Semporé *et al.*, 2013.) and southern Mali (Blanchard *et al.*, 2011).

It is also observed that the levels of autonomy vary from 17 to 70% related to a greater or lesser use of locally available common resources mainly fodder and firewood in the forest and savannas. The import of these resources reach 10-73% (of the total GE network) according to the farms. The most elevated autonomy values are observed among farms showing considerable animal load (in the case of fodder autonomy) and / or with availability of labor intensive (in the case of firewood autonomy).

The GEE varies in turn from 0.08 to 1.83 and is positively correlated with CLID and autonomy (Figure 2). Indeed, the storage crop residues allows limiting imports and thus improve the energy efficiency. But this storage of crop residues has a real impact on imports not only when the amounts stored by animal unit are important (crop and agro-pastoral farmers), but also when a good balance exists between the cultivated surfaces and the TLU number. It thus appears that an animal load of 1.5 TLU ha-1 allows a balance

between needs and resources and provide favorable conditions for recycling of biomass and optimal autonomy of farms.

The gross energy efficiency (0.08 to 1.83) observed in this study is very small compared to the efficiency of fossil energy described in similar conditions: 5-45; (Benagabou *et al.*, 2013; Vigne *et al.*, 2014), which shows that these farms substitute the mobilisation of fossil fuels by massive imports of gross energy of local resources.

4 Conclusions

Under original indicators, this study shows the limited recycling of gross energy within the family households in Koumbia and a low degree of autonomy among breeding farm and a higher autonomy among farmers and agro-pastoralists. It also explicitise that getting a good energy performance on the farm comes through a better integration and also a weak energy dependence with respect to the external environment.

References

- Allesina, S. & Ulanowicz, R.E. (2004). Cycling in ecological networks: Finn's index revisited. *Computational Biology and Chemistry*. 227–233.
- Alvarez, S., Rufino, M.C., Vayssières, J., Salgado, P., Tittone, P., Tillard, E., Bocquier, F. (2013). Whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: An application of network analysis. *Agricultural Systems*.
- Benagabou, I.O., Kanwe, B.A., Vall, E., Vigne, M. & Blanchard, M. (2013). Intégration agriculture-élevage et efficience énergétique des exploitations mixtes d'agriculture-élevage du Burkina Faso. *Rencontres Recherches Ruminants* 20, 298.
- Blanchard, M., Coulibaly, D., Ba, A., Sissoko, F. & Pocard-Chappuis, R. (2011). Contribution de l'intégration agriculture-élevage à l'intensification écologique des systèmes agrosylvo-pastoraux : le cas du Mali-Sud in *Recueil des communications présentées au Comité Scientifique du DP ASAP*. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 171 p.
- Lhoste, P. (1987). L'association agriculture-élevage. Evolution du système agropastoral au Sine-Saloum Sénégal. *Etudes et synthèses de l'IEMVT* 21. 314p.
- Finn, J.T. (1980). Flow analysis of models of the Hubbard brook ecosystem. *Ecology* 61, 562–571
- Rufino, M. C., Hengsdijk, H. & Verhagen, A. (2009). Analysing integration and diversity in agro-ecosystems by using indicators of network analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 84, 229-247.
- Semporé, A. (2013) Quelles stratégies pour améliorer l'intégration agriculture-élevage dans des exploitations de savane ouest-africaine ? Approches par simulation avec les producteurs. (soumis)
- Vall, E., Dugué, P. & Blanchard, M. (2006). Le tissage des relations agriculture-élevage au fil du coton. *Cahiers Agricultures* 15, 72-79.
- Vayssières, J., Vigne, M., Alary, V. & Lecomte, P. (2011). Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agricultural Systems*, 104, 146–161
- Vigne, M., Benagabou, I., Faverdin, P., Coulibaly, D., Ba, A., Vall, E., Kanwe, A. & Blanchard, M. (2014). Evaluation de l'efficience énergétique fossile des systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest : adaptations et perspectives méthodologiques. *INRA Productions. Animales*, 27 (5), 369-380

ANNEXE 2. Collecte des données et calcul des coefficients d'énergie

ANNEXE 2A. COLLECTE DES DONNÉES D'ÉNERGIE BRUTE

Tableau XVI. Procédure de calcul des flux de biomasse au sein des exploitations familiales mixtes

Origine des données : déclarée (D) ; mesurée (M) ; calculée (C) ; données de référence ou mesure spécifique- (R) ; EB = énergie brute ; EB1 ... EB30 (modèle conceptuel de l'énergie brute, page 46).

N° et intitulé du flux	Formules	Origine des données
EB1. Stockage des résidus de culture et cultures fourragères	$\sum_{n=1}^{14} (Nb \text{ charrette stockée}_n \times Poids \text{ moy charrette}_n)$ Pour n : 14 types de résidus de culture	Nb charrette stocké: D et M Poids moy charrette: R
EB2. Distribution de résidus de culture et fourrages aux animaux à l'auge	$\sum_{n=1}^{16} (Nb \text{ charrette distribuée à l'auge}_n \times Poids \text{ moy charrette}_n)$ Pour n : 16 types de fourrage, d'aliment et concentré bétail	Nb charrette distribué : M Poids moy charrette: R
EB3. Déjections animales à l'étable destinées aux fosses fumières + compostières + parcs+ fosse ordures ménagères	$\sum_{n=1}^6 (Nb \text{ charrette déjection dans FF}_n \times Poids \text{ moy charrette}_n) +$ $\sum_{n=1}^6 (Nb \text{ charrette déjection dans FC}_n \times Poids \text{ moy charrette}_n) +$ $\sum_{n=1}^6 (Nb \text{ charrette déjection dans tas ordures}_n \times Poids \text{ moy charrette}_n) +$ $\sum_{n=1}^6 (Nb \text{ heure par jour} \div 24 \times Nb \text{ de jour par an} \times Nb \text{ d'animaux}_n \times Coef \text{ UBT}_n \times (Qté \text{ bouse} + Qté \text{ urine par 24h})) + \sum_{n=1}^6 (Nb \text{ charrette déjection dans } \dots \times Poids \text{ moy charrette}_n)$ Pour n : 6 catégories d'animaux Nb : UP 4 dispose de 3 parcs fixes alors que les autres se limitent à 2 Calcule fait directement en matière sèche	Nb charrette déject en FF : D Nb charrette déject en FC : D Nb charrette déjection dans tas ordures : D Nb heure par jour : D Nb de jour par an : D Nb d'animaux : D Coef UBT : R Qté bouse : R Qté urine par 24h : R Nb charrette déject en biodigester : D Poids moy charrette : R
EB4. Refus de fourrage par les animaux au profit des stocks de fumure organique	$\sum_{n=1}^{16} (Qté \text{ fourrage distribué}_n \times Coefficient \text{ de refus}_n)$ Pour n : 16 types de fourrage, d'aliment et concentré bétail Coefficient de refus selon le type de fourrage : grossier, légumineuse ou concentré	Qté de fourrage distribué : C Coefficient de refus : R
EB5. Remplissage des fosses à compost avec les résidus de culture	$\sum_{n=1}^6 (nb \text{ de charrette RdC mis en fosse}_n \times Poids \text{ moy charrette}_n)$ Pour n : 6 types de résidus de culture, pour les 6 types d'installation de FO	Nb charrette RdC mis en fosse : D et M Poids moy charrette : R
EB6. Épandage de la fumure organique sur les champs de culture	$\sum_{n=1}^5 (nb \text{ de charrette FO épandue}_n \times Poids \text{ moy charrette}_n)$ Pour n : 5 types d'installation de FO (Parc fixe, Fosse fumière, Fosse à compost, Biodigester et Tas d'ordures)	nb de charrette FO épandue : M et D Poids moy charrette : R
EB7. Stockage des productions agricoles (graines) pour consommation humaine	$\sum_{n=1}^9 (nb \text{ de sac de graine}_n \times Poids \text{ moy sac}_n)$ Pour n : 9 types de graines	nb de sac de graine : M Poids moy sac : R
EB8. Autoconsommation	Vol de lait autoconsommé $\times$ Poids moy lait + Nb d'œufs autoconsommé $\times$ Poids moy oeuf +	Vol de lait autoconsommé : D et M

N° et intitulé du flux	Formules	Origine des données
des productions animales par la famille	$\sum_{n=1}^7 (Nb \text{ d'animaux autoconsommés}_n \times Coefficient \text{ UBT}_n)$ Pour n : 6 catégories de ruminants	Poids moy lait : R Nb d'œufs autoconsommés : D Poids moy œuf : R Nb d'animaux autoconsommés : D Coefficient UBT : R
EB9. Achat/dons de produits alimentaires	$\sum_{n=1}^{10} (Qté \text{ Produits agricoles achetés}_n \times Poids \text{ moy}_n) + \sum_{n=1}^4 (Qté \text{ Produits d'élevage achetés}_n \times Poids \text{ moy}_n) + \sum_{n=1}^3 (Qté \text{ Produits manufacturés achetés}_n \times Poids \text{ moy}_n)$ Pour n : 10 produits agricoles (Maïs, sorgho, mil, arachide, niébé, riz paddy, riz boutique, sésame, soja, poids d'angle), 4 produits d'élevage (lait, viande, poisson, œufs) et 3 produits manufacturés (huile, sucre, patate)	Qté Produits agricoles achetés : D et M Qté Produits d'élevage achetés : D et M Qté Produits manufacturés achetés : D et M Poids moy : R
EB10. Vente/dons de productions agricoles (ex. grains ou épis)	$\sum_{n=1}^{11} (Qté \text{ Produits agricoles vendus}_n \times Poids \text{ moy}_n)$ Pour n : 11 produits agricoles	Qté Produits agricoles vendus : D et M Poids moy : R
EB11. Achat/dons de produits non alimentaires (ex. charbon, bois).	Poids de charbon de bois consommé + Poids de bois consommés	Poids de charbon de bois : D et M Poids de bois : D et M
EB12. Achat/dons d'intrants agricoles (fumure organique, semences, herbicides, insecticides, engrais)	$\sum_{n=1}^4 (Charr \text{ FO achetée}_n \times Poids \text{ moy}_n) + \sum_{n=1}^{14} (Qté \text{ Semence achetée}_n) + \sum_{n=1}^{14} (nb \text{ bidon herbicide acheté} \times poids \text{ moy}_n) + \sum_{n=1}^2 (nb \text{ bidon insecticide acheté} \times Poids \text{ moy}_n) + \sum_{n=1}^3 (Sac \text{ engrais acheté} \times Poids \text{ moy}_n)$ Pour n : 4 types de FO (poudrette, fumier, compost, tas d'ordures) 14 semences de cultures différentes, 14 herbicides, 2 insecticides et 3 types d'engrais différents	Charr FO achetée : D Qté Semence achetée : D Nb bidon herbicide acheté : D Nb bidon insecticide acheté : D Sac engrais acheté : D Poids moy : R
EB13. Achat/dons de fourrages / aliments pour stockage pour alimentation des animaux.	$\sum_{n=1}^8 ((Charr \text{ de fourrage acheté}_n + Charr \text{ de fourrage stocké}_n) \times Poids \text{ moy}_n) + \sum_{n=1}^7 (Qté \text{ Aliments achetés}_n)$ Pour n : 8 fourrage acheté ou stocké depuis des champs extérieurs (dons) et 7 aliments et complément alimentaires achetés	Charr de fourrage acheté : D Charr de fourrage stocké : D Poids moy : R et M Qté Aliments achetés : D
EB14. Vente/dons d'animaux et de produits animaux (viande, animaux, lait, œuf)	$\sum_{n=1}^{10} (nb \text{ animaux vendus}_n \times Poids \text{ moy}_n) + nb \text{ œuf vendu} \times poids \text{ moy} + Volume \text{ de lait vendu} \times poids \text{ litre de lait}$ Pour n : 10 catégories animales (bœuf de trait, animal de 0-1 an, 1à3ans, mâle adulte, femelle adulte, ovin, caprin, porc, asin, volaille)	Nb animaux vendus : D Poids moy : R Nb œuf vendu : D Volume de lait vendu : D
EB15. Achat/dons d'animaux vivants	$\sum_{n=1}^{10} (nb \text{ animaux achetés}_n \times Poids \text{ moy}_n)$ Pour n : 10 catégories animales (bœuf de trait, animal de 0-1 an, 1à3ans, mâle adulte, femelle adulte, ovin, caprin, porc, asin, volaille)	Nb animaux achetés : D Poids moy : R

N° et intitulé du flux	Formules	Origine des données
EB16. Dépôt de déjections animales sur les parcours naturels (brousse)	$\sum_{n=1}^{14} (F 17_n \times (Fèces moy par UBT + urinaire) / 2 / Ingestion moy par$ Pour n : 14 catégories animales Pour les 3 saisons	F 17 : C Fèces moy par UBT : R Urinaire : R Ingestion moy par UBT : R
EB17. Consommation de fourrages sur les parcours naturels (brousse) EB18. Consommation des résidus de culture sur les champs extérieurs EB21. Consommation des résidus de culture sur les champs intérieurs (au sein de l'exploitation)	Hypothèse : en hivernage, 100 % des besoins des animaux hors affouragement est couvert sur les parcours Flux 17 SP $\sum_{n=1}^{14} (Nb d'animaux_n \times Coefficient UBT_n \times Ingestion moy journalière par UBT - (Qté fourrage distribué_n - Qté fourrage refusé_n))$ Pour n : 14 catégorie animale Hypothèse : en saison sèche froide, les besoins des animaux commencent à être couvert par : (1) l'affouragement des animaux ; (2) la vaine pâture sur les propres champs de l'exploitation dans la limite des résidus disponible (Rendement hors stockage) (3) la vaine pâture sur les champs extérieurs et les pâturages sur parcours suivant la proportion du temps passé sur ces milieux Flux 21 SSF Si les besoins du troupeau < Disponible en résidus de culture après stockage : besoins du troupeau couvert Sinon, disponible en résidus de culture après stockage consommé Et reste des besoins couverts par vaine pâture sur champs extérieur (F18 SSF) et parcours (F17 SSF) en proportion du temps passé sur ces milieux Hypothèse : en saison sèche chaude, les besoins des animaux commencent à être couvert par : (1) L'affouragement des animaux ; (2) Les pâturages sur parcours	Nb d'animaux : D Coefficient UBT : R Ingestion moy journalière par UBT : R Qté fourrage distribué : M Qté fourrage refusé : M Disponible en résidus après stockage : C Temps passé sur Parcours : D Temps passé sur champs extérieur : D
EB19. Dépôt de fumier sur les champs extérieurs	$\sum_{n=1}^{14} (F 18_n \times (Fèces moy par UBT + urinaire) / 2 / Ingestion moy par$ Pour n : 14 catégorie animale Pour les 3 saisons	F 18 : C Fèces moy par UBT : R Urinaire : R Ingestion moy par UBT : R
EB20. Dépôt de déjections animales sur les champs intérieurs (au sein de l'exploitation)	$\sum_{n=1}^{14} (F 21_n \times (Fèces moy par UBT + urinaire) / 2 / Ingestion moy par$ $+ \sum_{n=1}^6 (Nb heure par jour des animaux en parcage tournant \div 24 \times Nb de jour par an \times Nb d'animaux_n \times Coef UBT_n \times (Qté bouse + Qté urine par 24h)) +$ Pour n : 14 catégories animales Pour les 3 saisons	F 21 : C Fèces moy par UBT : R Urinaire : R Ingestion moy par UBT : R Nb heure parcage : D Nb de jour : D Nb d'animaux : D Qté bouse : R Qté urine : R
EB22. Autoconsommation des produits	$\sum_{n=1}^{10} (Qté Produits agricoles autoconsommés_n \times Poids moy_n)$	Qté Produits agricoles autoconsommés : D Poids moy : R

N° et intitulé du flux	Formules	Origine des données
agricoles pour la famille	Pour n : 10 produits agricoles (Maïs, sorgho, mil, arachide, niébé, riz paddy, riz boutique, sésame, soja, poids angole)	
EB23. Apport de déjections animales provenant d'animaux d'autres exploitations sur les champs de l'exploitation	$\sum_{n=1}^{14} (F_{25_n} \times (F\acute{e}ces\ moy\ par\ UBT + urinaire) / 2 / Ingestion\ moy\ par)$ Pour n : 14 catégories animales Pour les 3 saisons	F 25 : C Fèces moy par UBT : R Urinaire : R Ingestion moy par UBT : R
EB24. Vente/dons de fumure organique pour les champs (poudrette, fumier, compost...)	$\sum_{n=1}^{10} (Nb\ de\ charrette\ de\ FO\ vendue_n \times Poids\ moy\ charrette\ FO_n)$ Pour n : 10 types de Fumure organique	Nb de charrette de FO vendue : M et D Poids moy charrette FO : R
EB25. Prélèvements de résidus de culture des champs de l'exploitation par des troupeaux n'appartenant pas à l'exploitation	Calcul du disponible en RdC sur les champs pour la VP par animaux extérieurs $\sum_{n=1}^{13} (Surface_n \times Rendement\ graine_n \times Ratio\ Paille\ sur\ Graine_n) - Stockage\ RdC - F21 - Coef\ gaspillage\ en\ VP$ Pour n : 13 cultures Hypothèse : la VP par des animaux extérieurs intervient après le stockage et la VP interne. L'ensemble des pailles ne peut être consommée (gaspillage par passage des animaux)	Surface : M Rendement graine : M Ratio Paille sur Graine : R Stockage RdC : M F21 : C Coef gaspillage en VP : R
EB26. Vente/dons de résidus de culture provenant du stockage des résidus de culture.	$\sum_{n=1}^8 (nb\ de\ charrette\ Rdc_n \times Poids\ moy_n)$ Pour n : 8 résidus de culture (spathe de maïs, foin, pailles de maïs, sorgho, riz, fane d'arachide, niébé, poids angole)	nb de charrette Rdc : D poids moy : Rr
EB27. Ordures ménagères de la famille vers la fosse	$\sum_{n=1}^4 (Qt\acute{e}\ d'ordures\ apport\acute{e}_n)$ Pour n : 4 types d'installation de FO (Fosse fumi\ere, Fosse à compost, Biodigesteur et Tas d'ordures)	Qté d'ordures apporté : M
EB28. Dépôts des fèces et d'urine de la famille et MOE dans les latrines (sortie de l'exploitation).	$\sum_{n=1}^3 (Nb\ d'unit\acute{e}\ \grave{a}\ nourrir\ pr\acute{e}sente_n \times (Coefficient\ d'excr\acute{e}tion\ f\acute{e}cale\ annuel + Coefficient\ d'excr\acute{e}tion\ urinaire\ annuel))$ Pour n : 3 types d'unité à nourrir (famille, salarier et extérieur)	Nb d'unité à nourrir présente : D Coefficient d'excrétion fécale : R Coefficient d'excrétion urinaire : R
EB29. Vols et morts d'animaux	$\sum_{n=1}^{10} (nb\ animaux\ morts_n \times Poids\ moy_n) + \sum_{n=1}^{10} (nb\ animaux\ vol\acute{e}s_n \times Poids\ moy_n)$ Pour n : 10 catégories animales (bœuf de trait, animal de 0-1 an, 1à3ans, mâle adulte, femelle adulte, ovin, caprin, porcine, asin, volaille)	nb animaux morts : D nb animaux volés : D Poids moy : R
EB30. Utilisation d'une partie des productions végétales stockées comme semences.	$\sum_{n=1}^3 (Qt\acute{e}\ de\ semence\ utilis\acute{e}_n)$ Pour n : 13 cultures	Qté de semence utilisée : D

Tableau XVII. Protocole mis en place pour le suivi et les mesures des flux d'énergie brute

Numéro et intitulé du flux	Enquête	Suivi et Mesure	Matériel utilisé	Fréquence
EB1. Stockage des résidus de culture et cultures fourragères	Quantité stockée en unité locale		Balance Bâche Botteleuse	Enquête mensuelle

Numéro et intitulé du flux	Enquête	Suivi et Mesure	Matériel utilisé	Fréquence
	(charrette, bottes, tas...)		Charrette	Fin campagne agricole
EB2. Distribution de résidus de culture et fourrages aux animaux à l'auge		Constitution des animaux en lots Pesée de la quantité distribuée à chaque lot	Balance	Une semaine par mois
EB3. Déjections animales à l'étable destinées aux fosses fumières + compostières + parcs + fosse ordures ménagères	1. Quantité en unité locale		Balance	Selon la fréquence de nettoyage de l'étable, bergerie, hangar.
EB4. Refus de fourrage par les animaux au profit des stocks de fumure organique		Ramassage de la paille distribuée et refusée à chaque lot et mise en sac. Pesée de la quantité refusée le lendemain	Balance Sac fibreuse	Une semaine par mois
EB5. Remplissage des fosses compostières avec les résidus de culture		Mesure du nombre de charrette introduite dans les fosses en distinguant les différents types de résidus de culture.	Charrette Balance	Enquête mensuelle
EB6. Épandage de la fumure organique sur les champs de culture		Quantité de fumure organique apportée au champ.	Charrette Balance	Enquête mensuelle
EB7. Stockage des productions agricoles (graines) pour consommation humaine	Quantité stockée en unité locale (sac)		Balance Sac	Enquête mensuelle Fin campagne agricole
EB8. Autoconsommation des productions animales par la famille	Le nombre d'animaux prélevé dans le troupeau familial		Déclaration	Enquête mensuelle
EB9. Achat/dons de produits alimentaires	Produits alimentaire acheté		Déclaration	Enquête mensuelle
EB10. Vente/dons de productions agricoles (ex. grains ou épis)	Produits agricoles donnés		Déclaration	Enquête mensuelle
EB11. Achat/dons de produits non alimentaires (ex. charbon, bois).	Produits non alimentaire acheté		Déclaration	Enquête mensuelle
EB12. Achat/dons de fumure organique pour les champs (poudrette, fumier, compost...)	Fumure organique achetée		Déclaration	Enquête mensuelle
EB13. Achat/dons de résidus de culture, fourrages pour stockage pour	Résidus de culture achetée		Déclaration	Enquête mensuelle

Numéro et intitulé du flux	Enquête	Suivi et Mesure	Matériel utilisé	Fréquence
alimentation des animaux.				
EB14. Vente/dons de produits animaux	Lait, œufs vendus		Déclaration	Enquête mensuelle
EB15. Achat/dons d'animaux vivants	Animaux vivants achetés		Déclaration	Enquête mensuelle
EB16. Dépôt de déjections animales sur les parcours naturels (brousse)	Calculé à partir du flux 17			
EB17. Consommation de fourrages sur les parcours naturels (brousse)	Enquête sur le temps passé par les animaux sur les champs du propriétaire Utilisation de GPS pour localiser les lieux	Prélèvement de fèces les soirs	Données de la littérature en tenant compte des rendements paille-grain GPS	Enquête mensuelle Prélèvement de fèces 1 semaine/ 1 mois.
EB18. Consommation des résidus de culture sur les champs extérieurs	Enquête sur le temps passé par les animaux sur les champs du propriétaire Utilisation de GPS pour localiser les lieux	Prélèvement de fèces les soirs	Données de la littérature en tenant compte des rendements paille-grain GPS	Enquête mensuelle Prélèvement de fèces 1 semaine/ 1 mois.
EB19. Dépôt de fumier sur les champs extérieurs	Calculé à partir du flux 18			
EB20. Dépôt de déjections animales sur les champs intérieurs (au sein de l'exploitation)	Calculé à partir du flux 21			
EB21. Consommation des résidus de culture sur les champs intérieurs (au sein de l'exploitation)	Enquête sur le temps passé par les animaux sur les champs du propriétaire Utilisation de GPS pour localiser les lieux	Prélèvement de fèces les soirs	Données de la littérature en tenant compte des rendements paille-grain GPS	Enquête mensuelle Prélèvement de fèces 1 semaine/ 1 mois.
EB22. Consommation alimentaire et non alimentaire pour la main d'œuvre familiale et extérieure	Types de produits consommés		Déclaration	Enquête mensuelle
EB23. Apport de déjections animales provenant d'animaux d'autres exploitations sur les champs de l'exploitation	Estimé à partir du flux 25		Estimé à partir de la littérature (en même temps que le flux 25)	
EB24. Vente/dons de fumure organique pour	Nombre de charrette vendu		Déclaration	Enquête mensuelle

Numéro et intitulé du flux	Enquête	Suivi et Mesure	Matériel utilisé	Fréquence
les champs (poudrette, fumier, compost...)	par type de fumure organique			
EB25. Prélèvements de résidus de culture des champs de l'exploitation par des troupeaux n'appartenant pas à l'exploitation	Quantité stockée		Estimé à partir de la littérature (la disponibilité en résidus de culture de la parcelle)	Fin saison pluvieuse
EB26. Vente/dons de résidus de culture provenant du stockage des résidus de culture.	Nombre de sac vendu par type de culture		Déclaration	Enquête mensuelle
EB27. Ordures ménagères de la famille vers la fosse		Collecte journalière des ordures, tri des différents éléments composant les ordures	Balance Sachet plastique	Une semaine par mois
EB28. Dépôts des fèces et d'urine de la famille et MOE dans les latrines (sortie de l'exploitation).	Enquête sur le nombre de personne présente		Estimé à partir de la littérature	Enquête mensuelle
EB29. Vols et morts d'animaux	Déclaration du producteur			Enquête mensuelle
EB30. Utilisation d'une partie des productions végétales stockées comme semences.	Enquête		Balance	Saison pluvieuse

EB = énergie brute ; EB1 ... EB30 (voir modèle conceptuel sur énergie brute à la page 46)

ANNEXE 2.B. COEFFICIENTS D'ENERGIE BRUTE

Les coefficients d'énergie brute ou quantité d'énergie brute dans une unité de biomasse ont été empruntés à la littérature.

Tableau XVIII. Liste du contenu énergétique des biomasses utilisées et les teneurs en matière sèche

Détails	MJ/kgMS ou MJ/kgPV	Référence	%MS	Reference MS
Produits agricoles				
Maïs	17,70	Vigne, 2012	0,912	Le Thiec, 1996
Sorgho	17,92	Vigne, 2012	0,91	Le Thiec, 1996
Mil	17,79	Bénagabou, 2011	0,925	Le Thiec, 1996
Niébé	18,59	Bénagabou, 2011	0,892	Richard <i>et al.</i> ,1990
Arachide	27,50	Feedipedia	0,96	Feedipedia
Riz paddy	17,67	Bénagabou, 2011	0,89	Le Thiec, 1996
Riz boutique	15,32	Feedipedia	0,88	Feedipedia
Sésame	25,26	USDA 2004	0,95	USDA 2004
Soja	17,51	Bénagabou, 2011	0,91	USDA 2004
Aliment de l'homme				
Lait	23,58	USDA 2004 2,9 MJ/kg MB	0,123	Fiche lait INRA
Viande	95,89	USDA 2004 : 11,8 MJ/kg MB Sheep meat	0,123062	Muscle
Poisson	21,90	Feedipedia	0,28	Feedipedia
Œufs	22,74	USDA 2004	0,92	Rufino <i>et al.</i> , 2009a
Huile	37,11	Feedipedia	0	Feedipedia
Sucre	17,10	Feedipedia	0,97	Feedipedia
Pate alimentaire	14,95	Feedipedia	0,9	Feedipedia
Résidus de culture pâturés extérieur	13,80	Vigne, 2012		
Fourrages bas-fond pâturés extérieur	14,35	Vigne, 2012		
Coton	18,07	Bénagabou, 2011		
Achat d'animaux				
Bœuf de Labour	9,19	PLANETE Risoud et Théobald 2002		
Taureaux	9,19			
Vaches	9,08			
Bovins 0-1 an	6,11			
Bovins 0-3 ans	9,08			
Ovins	13,60			
Caprins	6,11			
Porcins	13,60			
Asins	13,40			
Volailles	6,49			
Aliments du troupeau achetés				
Tourteaux de coton	18,62	Vigne, 2012	0,92	Calvet, 1973
Son de céréales	20,36	Vigne, 2012	0,92	Mémento de l'agronome 1980
Drêches	60,00	Feedipedia	0,3	Mémento de l'agronome 1980
Fanes de Niébé	17,08	Jarrige, 1988	0,867	Jarrige, 1988
Paille de Riz	15,91	Jarrige, 1988	0,88	Jarrige, 1988
Paille de Maïs	17,90	Feedipedia	0,93	Jarrige, 1988
Paille de Sorgho	18,08	Jarrige, 1988	0,88	Jarrige, 1988
Fanes d'arachide	17,71	Jarrige, 1988	0,888	Jarrige, 1988

Parcours naturels pâturés	17,46	Vigne, 2012		
Flux internes				
Fumure organique produite	17,850	Vigne, 2012		
Déchets ménagers	14,000	Vigne, 2012		
Terre de parc	10,467	Vigne, 2012		
Fumier des fosses fumures	10,467	Vigne, 2012		
Compost des fosses fumures	10,467	Vigne, 2012		
Terre de boues de digesteur	13,245	Vigne, 2012		
Déjections animales fraîches déposées par vaine pâture	17,850	Richard <i>et al.</i> ,1990		
Productions végétales pâturées				
Paille de Maïs	17,90	Feedipedia		
Paille de Sorgho	18,08	Jarrige, 1988		
Paille de Mil	17,16	Jarrige, 1988		
Fanes d'Arachide	17,71	Jarrige, 1988		
Fanes de Niébé	17,08	Jarrige, 1988		
Paille de Riz	15,91	Jarrige, 1988		
Tiges coton	23,73	Vigne, 2012		
Tiges sésame	23,73	Jarrige, 1988		
Poids d'angole	19,70	Feedipedia	0,311	Feedipedia
Herbe Jachères	17,,46	Vigne, 2012		
Productions végétales distribués				
Son de céréales	21,12	Vigne, 2012	0,887	Feedipedia

Des matières sèches ont été réalisées à l'étuve sur des échantillons de déjections animales, de refus de fourrages et de fourrages stockés.

ANNEXE 2.C. COEFFICIENTS D'ÉNERGIE FOSSILE

Le principe du calcul des coefficients d'énergie fossile est identique pour les intrants fossiles ou fabriqués à partir d'énergie fossile (Tableau XIX, Tableau XX, Tableau XXI, Tableau XXII, Tableau XXIII, Tableau XXIV). Trois notions sont à prendre en compte : (i) la nature de l'élément considéré : combustible fossile comme le carburant et les intrants produits à partir d'énergie fossile (matériel, infrastructure, résidus de culture...) ; (ii) la distance parcourue du lieu d'extraction ou de lieu de production à son lieu d'utilisation ; et (iii) le moyen de transport utilisé (aérien, maritime, terrestre).

Les intrants fossiles sont classés par catégorie : le carburant et les produits phytosanitaires, les grains et résidus de culture, les concentrés alimentaires et complexes minéraux et vitamines, le matériel, les infrastructures, les semences et les résidus de culture, les aliments concentrés, les complexes minéraux et vitaminés, les produits manufacturés, etc.

Carburants et produits phytosanitaires

Le calcul des coefficients d'énergie fossile des fertilisants minéraux, des produits phytosanitaires et des combustibles est détaillé dans le Tableau XIX. Les coûts en énergie fossile pour la production (Gaillard *et al.* 1997) et les coûts énergétiques pour le transport (Risoud et Theobald 2002) sont précisés.

Tableau XIX. Coefficients d'énergie fossile des fertilisants minéraux, produits phytosanitaires et combustibles fossiles

Catégorie	Substance chimique	Coût de production					Transport, moyen de transport et origine								Coefficient d'énergie fossile (Coût de production et de transport)
		Eléments chimiques	Proportion des éléments (pourcentage)	Cout de production par kg d'élément chimique (MJ/unité)	Cout de production total par élément chimique	Cout de production total d'une unité (kg,L, d'intrant	Maritime				Routier/Camion				
							Lieu de producti on	Distance	Coût de transpor t par MJ.km ⁻¹ .kg	Coût total transport maritime	Lieu de producti on	Distance (km)	Coût de transport par MJ.km-1.kg	Coût total transport maritime	
Combustible fossile (Carburant) (L)	Essence		41,5			41,5	Afrique de l'ouest	1100	2,50E-05	0,03	Abidjan-Bobo-Koumbia	950	8,50E-04	0,8075	42,34
	Gazole		40,7			40,7		1100	2,50E-05	0,03	Abidjan-Bobo-Koumbia	950	8,50E-04	0,8075	41,54
Fertilisation minérale (kg)	Urée	N	46%	49,2	22,632	22,632	Asie-Abudjan	13000	2,50E-05	0,325	Abidjan-Bobo-Koumbia	950	8,50E-04	0,8075	23,76
	Engrais céréales (12-20-15)	N	12%	43	5,16	8,655	Asie-Abudjan	13 000	2,50E-05	0,325	Abidjan-Bobo-Koumbia	950	8,50E-04	0,8075	9,79
		P	20%	11,4	2,28										
		K	15%	8,1	1,215										
	Engrais coton (14-23-14)	N	0,14	43	6,02	9,776	Asie-Abudjan	13 000	2,50E-05	0,33	Abidjan-Bobo-Koumbia	950	8,50E-04	0,8075	10,91
		P	0,23	11,4	2,622										
		K	0,14	8,1	1,134										
Produits phytosanitaires	Altram	Atrazine	0,5	414	207	207	Les quantités de produits phytosanitaires consommées par les exploitations sont faible (<10L). Le cout d'énergie indirecte engendré par le transport est négligeable								
	Acepronet 400 EC	Acetochlore	0,25	414	103,5	165,6									
		Prométhryte	0,15	414	62,1										
	Cotodon	Métolachlore	0,16	414	66,24	165,6									
		Dipropéthryne	0,24	414	99,36										
	Gallant Super	Haloxyfop-R-mélb)l (104 g.1)	0,104	414	43,056	43,056									
	Glycel	Glypbosate	0,71	414	293,94	293,94									
	Herbiriz 100 (g/kg)	Bensulfuron méthyl	0,1	340	34	34									
	Herbicoton	Fluométuron	0,44	414	182,16	364,32									
		Prométrync	0,44	414	182,16										
	Round Up	Glypbosate	0,36	414	149,04	149,04									
	Touch Down	Glypbosate	0,36	414	149,04	149,04									
	Conquest	Acétamipride	0,32	359	114,88	114,88									
Cyperméthrine		0,144	359												

Les ports de ravitaillement 5(Lomé-Cotonou-Tema-Abidjan) du Burkina Faso sont situés à environ 1 100 km de la capitale

Les produits pétroliers sont importés de l'Afrique de l'Ouest (<https://www.voltatic.com/situation-energetique-afrique-ouest/>)

Les produits phytosanitaires présentés ici sont ceux homologués par le CILSS (CORAF/WE CARD) 2012)

❖ Grains et résidus de culture

Le calcul des coûts énergétiques des grains et des résidus de culture se base sur les itinéraires techniques des cultures et un bilan énergétique à l'échelle d'un hectare de culture. Puis la consommation à l'hectare est séparée selon le ratio énergétique entre la production de grain et de paille (rendement obtenu dans la littérature).

Exemple de la culture du maïs

1. D'après le suivi, l'itinéraire technique moyen est composé de l'utilisation des produits phytosanitaire par ha : 1L de glycel + 2L de Altram + 100kg de NPK et 50 kg d'urée.
2. On détermine la production moyenne de grains et de résidus de culture (kg MB, kg MS, MJ/kg MS) et on calcule la part de l'énergie produite contenue dans les résidus.
3. On calcule enfin, la part de l'énergie fossile nécessaire pour produire 1 kg de MS du type de biomasse considérée.
 - Pour les grains : Coefficient grain = $\frac{48\% \times 2169,5}{1210}$
 - Pour les résidus de culture : Coefficient résidus de culture = $\frac{52\% \times 2169,5}{1310}$

Tableau XX. Coefficients d'énergie fossile des graines et résidus des principales cultures

Culture	Intrants consommés	Quantité	Coef. énerg.	Coût énergétique MJ/ha	Productions			Coeff EF (MJ/kgMS)	
		(unité/ha)	(MJ/ L ou kg)		Unités	Paille	Grain	Paille	Grain
Maïs	Glycel	1L	149	149	(kg/ha)	2 500	1 400	0,86	0,86
	Altram	2L	207	414	(kgMS/ha)	1 310	1 210		
	NPK	100kg	10.12	1012	(MJ/kgMS)	18	18		
	Urée	50kg	11.89	594,5	EB total/ha	23 449	21 659		
					Proportions	52%	48%		
	TOTAL			2169,5					
Sorgho	Glycel	1L	149	149	(kg/ha)	3200	900	0,043	0,042
					(kgMS/ha)	2720	778,5		
					(MJ/kgMS)	18,08	17,92		
					EB total/ha	49 178	13 951		
					Proportions	78%	22%		
Niébé	Glycel	1L	149	149	(kg/ha)	800	600	0,117	0,127
					(kgMS/ha)	693,6	535,2		
					(MJ/kgMS)	17,08	18,58		
					EB total/ha	11 847	9 944		
					Proportions	54%	46%		
Arachide	Glycel	2L	149	298	(kg/ha)			0,227	0,166
					(kgMS/ha)	800	700		
					(MJ/kgMS)	17,71	13		
					EB total/ha	14 168	9 100		
					Proportions	61%	39%		
Coton	Herbicides totaux	1	149	149	(kg/ha)	2 353	1 718	0,920	0,957
	Herbicides sélectifs	2,3	290	667	(kgMS/ha)	1 781	1 632		
	Conquest	6	114,88	689	(MJ/kgMS)	17,96	18,68		
	NPK	100	11,89	1 189	EB total/ha	31 991	30 488		
	Urée	50	10,11	506	Proportions	51%	49%		
	TOTAL			3 200					

Tableau XXI. Coefficients d'énergie fossile des graines et résidus des cultures secondaires

Culture	Intrants consommés	Quantité (unité/ha)	Coef. éner- g. (MJ/ L ou kg)	Coût énergétique MJ/ha	Productions			Coeff EF (MJ/kgMS)	
					Unités	Paille	Grain	Paille	Grain
Riz	NPK	100 kg	10,12	1012	(kg/ha)	3750	1250		
	Glycel	6 L	149	894	(kgMS/ha)	3300	1 113		
					(MJ/kgMS)	15,91	15,73		
					EB total/ha	52 503	17 500		
					Proportions	75%	25%		
	TOTAL			1694,5				0,385	0,381
Sésame	Glycel	2L	149	298	(kg/ha)	2000	400		
					(kgMS/ha)	1514	380		
					(MJ/kgMS)	17,96	29,5		
					EB total/ha	27 191	11 210		
					Proportions	71%	29%		
	TOTAL			298				0,139	0,229
Mil	Glycel	2L	149	298	(kg/ha)	2400	600		
					(kgMS/ha)	2114,4	555		
					(MJ/kgMS)	17,16	17,79		
					EB total/ha	36 283	9 873		
					Proportions	79%	21%		
	TOTAL			298				0,111	0,115

❖ Concentrés alimentaires, complexes minéraux et vitamines et frais vétérinaires

Tableau XXII. Coefficients d'énergie fossile des concentrés alimentaires

	Rendements au décortilage ou transformation	Coefficients EF	Unités	Remarques	Références
Son de céréales	30%	0,258	MJ/kgMS	Dérivée des grains de maïs. Coefficient EF = 0,86MJ.kg ⁻¹ .MS	Ndjouenkeu <i>et al.</i> , 1989
Tourteaux de coton	20,5%	0,196	MJ/kgMS	Dérivée des fibres de coton. Coefficient EF = 0,957	(INERA 1994)
Sel	-	0,99	MJ/kg	Sel provient des pays cotiers aux alentours du golf de guinée (environ 1100km de Ouagadougou, la capitale du Burkina Faso). En l'absence de données précises sur les processus de production du sel, on considère seulement le coût de transport soit 1170km et un coût énergétique de 0.85MJ/km.t	Risoud et Theobald, 2002
Produits vété	-	0,0114 MJ/Fcfa	MJ/Fcfa	1,14 MJ/F français	Risoud et Theobald, 2002

EF : énergie fossile ; MS : matière sèche

❖ Bâtiments et matériel

Matériels : On considère des coefficients énergétiques utilisés dans PLANETE (Risoud et Theobald 2002).

Tableau XXIII. Coefficients d'énergie fossile du matériel

Type de matériel	Poids (kg)	Coef. Energétique (MJ/kg)	Coef. Energétique (MJ/type)	Coût énergétique par an (MJ/an) ¹
Appareil à dos	10	95.4	954	80
Charrette asine	60	95.4	5 724	477
Charrette bovine	150	95.4	14 310	1 193
Tombereau	100	95.4	9 540	795
Charrue	50	99.2	4 960	413
Congélateur	80	95.4	6680	557
Corps butteur	40	99.2	3968	331
Moto	80	83.5	6680	557
Sarcleur	60	99.2	5952	496
Vélo	15	95.4	1431	119

¹ On considère ici un amortissement moyen de 12 ans

Bâtiments

Pour les bâtiments, les valeurs sont issues de PLANETE (Risoud et Theobald, 2002) ou Vigne (2007).

Tableau XXIV. Coefficients d'énergie fossile des bâtiments

Type de bâtiment	Coût énergétique (MJ/unité)	Coût énergétique (MJ/unité/an)	Unité	Observations	Références
Bâtiment d'habitation en parpaing	790	39,5	MJ/m ²		Vigne, 2007 ; PLANETE
Etable bois	0		MJ/m ²		PLANETE
Etable banco	0		MJ/m ²		PLANETE
Etable en ciment	790	39,5	MJ/m ²		Vigne, 2007 ; PLANETE
Fosse en dure	66,67	3,33	MJ/m ³	3sacs de ciment avec 4MJ/kg ciment pour fosse (Longueur * largeur * Profondeur =3*3*3)	Vigne, 2007 : coefficient d'une fosse à lisier
Fosse sans consolidation	0		MJ/m ²		PLANETE
Hangar en bois	0		MJ/m ²		PLANETE
Hangar en banco	0		MJ/m ²		PLANETE
Parc en bois	0		MJ/unité		PLANETE
Parc en fer barbelé	15	0,75	MJ/kg linéaire	En référence à l'acier 15MJ/kg en l'absence de données sur le fer.	PLANETE

Un amortissement de 20 ans est considéré pour les bâtiments

ANNEXE 2.D. ENERGIE DU TRAVAIL

2.D.1. Protocole mis en place pour le suivi des flux d'énergie du travail

La mise en œuvre des flux d'ET n'est pas séparée des flux des autres formes d'énergie. Elle a la même fréquence de collecte que les flux de biomasse (Tableau XVII) et d'énergie fossile sauf pour les flux spécifiques n'impliquant pas des flux de biomasse et d'EF (labour, sarclage, buttage, entre juillet et septembre ; nettoyage étable entre janvier-mai ; traite toute l'année).

La mesure a concerné uniquement l'utilisation du chronomètre pour déterminer la durée de réalisation de quelques activités. Les travaux dont le temps de réalisation ont été mesurés à l'aide d'un chronomètre sont : labour, sarclage, buttage, récolte, remplissage et vidange des fosses de fumure organique, affouragement des animaux, nettoyage des étables, traite.

Les travaux dont le temps de réalisation ont été déclarés sont : transport de fumure organique au champ, des intrants du marché à la concession, collecte des résidus de culture et transport à la concession.

L'estimation de l'énergie dépensée lors des travaux a été rendue possible par l'utilisation des valeurs de la littérature pour les humains (homme, femme et enfant) et pour les animaux (bovin, âne ; Torun *et al.*, 1982 ; Passmore et Durnin 1955).

Aucun dispositif mobilisant les expérimentations par colorimétrie directe ou indirecte mesurant les consommations en oxygène d'un individu durant une activité physique (Gouba Emile, 1980 ; Lawrence et Stibbards, 1990) n'a été adopté lors de l'étude au vu de l'exigence en temps et en matériel que cela représenterait.

2.D.2. Les coefficients d'énergie du travail

Des valeurs de dépenses énergétiques issues de la littérature ont été utilisées après un inventaire de l'ensemble des activités effectuées sur les exploitations agricoles et leurs classements suivant un gradient de difficulté estimé pour 1h de travail. Une liste des activités réalisées dans les exploitations avait été élaborée en 2011 dans les mêmes exploitations et classée en fonction du gradient de pénibilité (Benagabou *et al.*, 2011 ; Vigne *et al.*, 2012) ; cette liste a été actualisée au cours de cette étude pour prendre en compte les nouvelles activités ou celles omises.

❖ Coefficients d'énergie de travail pour les humains

Pour obtenir les valeurs de dépenses énergétiques pour les humains, la méthodologie a consisté à :

1. Regrouper par rapprochement les travaux en 5 classes : travaux faciles, travaux moyens (-), travaux moyens, travaux moyens (+) et travaux difficiles ;

2. Rechercher les valeurs pour un homme dans la littérature pour les types de travaux extrêmes : de 0,65 MJ.h⁻¹ pour la conduite d'engin motorisé (Torun *et al.*, 1982) à 5,90 MJ.h⁻¹ pour le labour manuel (Passmore et Durnin 1955) ;
3. Calculer les valeurs pour chaque classe en divisant la différence entre les deux valeurs extrêmes pour les 5 classes ;
4. Les coefficients énergétiques physiques pour les femmes et les enfants ont été obtenus à partir de ratios établis en fonction de celui des hommes (FAO et OMS, 1973), en considérant les besoins énergétiques journaliers moyens pour une femme (85%) et un enfant âgé de moins de 14 ans (75%) ;
5. Le transport étant exprimé en km, nous avons considéré une moyenne de 5 km.h⁻¹ pour les piétons et 15km.h⁻¹ pour cyclistes.

Tableau XXV. Répartition par classe des travaux suivant le gradient de pénibilité

Flèche indiquant le gradient de pénibilité des travaux ↓

Classes de difficulté	Type de travaux	Dépense énergétique (MJ.h ⁻¹) et MJ.km ⁻¹ pour				
		Homme	Femme	Enfant	Asin	Bovin
Facile	Traite Transport avec animaux Traitement motorisé Transport à vélo Conduite des animaux au pâturage	0,65	0,49	0,55	0,208 MJ.km ⁻¹	0,416 MJ.km ⁻¹
Moyen (-)	Transport à pied avec charge Distribution manuelle des aliments Traitement phytosanitaire manuel Apport de NPK Egrenage motorisé	0,86	0,65	0,73		
Moyen	Puisage de l'eau Semis manuel Epannage de fumure organique	1,08	0,81	0,91		
Moyen (+)	Buttage avec animaux Sarclage avec animaux Récolte des grains Récolte des résidus de culture Egrenage manuel	1,29	0,97	1,10	16,32 MJ.ha ⁻¹	25,5 MJ.ha ⁻¹
Difficile	Labour avec animaux Nettoyage des parcs Désherbage manuel Labour manuel	1,50	1,13	1,28	19,2 MJ.ha ⁻¹	30 MJ.ha ⁻¹
NB : Cas exceptionn el du transport	Transport à vélo (facile)	0,032 km.h ⁻¹	0,037 km.h ⁻¹	0,043 km.h ⁻¹		
	Transport à pieds (moyen)	0,13 km.h ⁻¹	0,11 km.h ⁻¹	0,10 km.h ⁻¹		

Attention : pour transport et animaux, les unités sont exprimées en MJ.km⁻¹

❖ Coefficients d'énergie de travail pour les animaux

Pour le calcul des coefficients de dépense d'énergie des animaux lors des travaux, des équations sont établis (Lawrence et Stibbards., 1990 ; Fall *et al.*, 1997) en fonction de la nature de leur utilisation (transport, labour, sarclage, buttage) des animaux.

1. Pour le transport nous avons considéré l'équation de Lawrence et Stibbards (1990) établit à partir du poids de la charge transportée par les animaux. L'énergie de chargement est de $2,6.10^{-3}$ MJ/km/kg chargé (Lawrence et Stibbards., 1990). En considérant que :
 - un âne tire en moyenne 80 kg, on obtient une dépense énergétique de $2,08. 10^{-1}$ MJ.km⁻¹ ;
 - un bœuf de trait tire en moyenne 160 kg, on obtient une dépense énergétique de $4,16.10^{-1}$ MJ.km⁻¹.
2. Pour le labour on se base sur l'équation de Fall *et al.* (1997) qui considère une dépense énergétique de marche sur le sol d'approximativement 2 J/m/kg poids vif et une dépense énergétique pour le labour approximativement 3 fois supérieure à la marche.
 - Un âne de 160 kg de poids vif dépensera 0,32 MJ.km⁻¹ à la marche et 0,96 MJ.km⁻¹ au labour
 - Un bœuf de 250 kg dépensera 0,5 MJ.km⁻¹ à la marche et 1,5 MJ.km⁻¹ au labour

La conversion en ha donne respectivement 30 et 19,2 MJ. ha⁻¹ en considérant pour 1 ha, une distance de 20 000 m parcourue par les animaux (200 passages de 100m pour une distance entre lignes de 0,5 m).

3. Pour le sarclage et le buttage, on se base sur le ratio de l'énergie de travail humain pour réaliser le sarclage et le buttage. Cela montre un ratio de 85% de la dépense énergétique du labour.

Les ânes et les bovins dépensent respectivement 16,32 et 25,5 MJ. ha⁻¹ pour les ânes et les bovins.

Ces valeurs sont proches de celles de Bleiberg *et al.* (1980) qui ont réalisé une mesure directe des dépenses d'énergie sur des femmes en hautes volta et de ceux de Bartholomew *et al.* (1994) sur les zébus au Mali.

ANNEXE 3. FICHE DE SUIVI DES EXPLOITATIONS

Point GPS de la concession :

Identification du chef d'exploitation

Nom et prénom
Ethnie.....
Religion.....
Niveau d'instruction ☐ Primaire ☐ Secondaire ☐ Ecole coranique ☐ Autres.....

Activités de la ferme

Activité principale : ☐ Agriculture ☐ Élevage ☐ Autre
Activités secondaires : ☐ Agriculture ☐ Élevage ☐ Autre

RUBRIQUE 1 et 2. MAIN D'ŒUVRE

Main d'œuvre familiale

Compléter les informations suivantes au cours de l'année (type de travaux réalisé par les membres de la famille)
Préciser si les membres de la famille sont présents sur l'exploitation toute l'année et en cas d'absence donner la durée

	Prénoms	Age	Liens de parenté au chef d'UP	Type de travail sur l'UP	En cas d'absence : durée de l'absence
	<i>Nom</i>	<i>An</i>	<i>Femme, belle-sœur, fille, etc...</i>	<i>Semis, labour...</i>	<i>Nb de jour</i>
Chef de ménage					
Autres hommes > 15 ans					
Femmes > 15 ans					
Enfants < 15 ans					

Accueil de personnes étrangères sur l'exploitation au cours de l'année

Indiquer le nb d'étranger arrivées sur l'exploitation au cours de l'année et la durée du séjour

	Prénoms	Age	Liens de parenté au chef d'UP	Type de travail sur l'UP	Durée du séjour sur l'exploitation
	<i>nom</i>	<i>An</i>	<i>Femme, fille, etc...</i>	<i>Semis, labour...</i>	<i>Nb de jour</i>
1					
2					

Main d'œuvre salariée

Indiquer le nb de salarié et le temps de travail au cours des 3 saisons entre mai 2013 et mai 2014

Noms et Prénoms	Sexe	Age	Type de travail sur exploitation	Mars - Avril		Mai - Octobre		Novembre-Février		Consommation dans le grenier familial ?
				Heure / jour	Jour / semaine	Heure / jour	Jour / semaine	Heure /jour	Jour /semaine	
				<i>h/j</i>	<i>j/ sem</i>	<i>h/j</i>	<i>j/ sem</i>	<i>h/j</i>	<i>j/ sem</i>	
1										
2										

Main d'œuvre extérieure (ponctuelle)

Nb de personne	Sexe	Age	Type de travail sur exploitation	Mars-Avril		Mai-Octobre		Novembre-Février		Consommation dans le grenier familial ?
				Heure par jour	Jour par semaine	Heure par jour	Jour par semaine	Heure par jour	Jour par semaine	
				<i>h/j</i>	<i>j/ sem</i>	<i>h/j</i>	<i>j/ sem</i>	<i>h/j</i>	<i>j/ sem</i>	
<i>nb</i>	<i>M, F</i>	<i>an</i>	<i>Semis, labour</i>							<i>Oui / Non</i>

RUBRIQUE 3. ALIMENTATION DE LA FAMILLE ET PERSONNES EXTERIEURES

Autoconsommation

Consommation des productions de l'exploitation

Indiquer la quantité de produit en kg, en sacs de 100 kg, etc... issus du « grenier » consommé par la famille

Date	Mai	Juin	Juill et	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc	Janv .	Févr	Mar	Avril	Provenance (grenier ou achat) si achat préciser lieu, nb person ; lieu d'achat
Maïs													
Sorgho													
Mil													
Riz													
Ovins													
Caprins													
Volailles													
Porcins													
Lait													
Œufs													
Bois et charbon													
Pain, thé, sucre...													

RUBRIQUE 4. BÂTIMENTS ET MATÉRIEL

Les bâtiments

Indiquer les bâtiments de l'exploitation et Indiquer les nouveaux bâtiments construits au cours du suivi (âge => date de la construction)

Type de bâtiments	Nb	Type de matériaux			Type de toit		Localisation		Age	Dimension	
		Bois	Banco	Ciment	Paille	Tôles	Champ	Maison		Larg.	Long, m
Etable											
Fosses											
Logements											

Gros et petit matériel en propriété

Indiquer le gros matériel en propriété et les achats au cours du suivi (âge => date de la construction)

Type	Nb	Type, cylindree et puissance	Année acquisition	État d'origine	Lieu d'achat	Valeur d'achat
			année	neuf, 2 ^{de} main	lieu	Fcfa
Vélo-Moto						
Plaque photovoltaïque						
Charrue						
Charrette						

CONSOMMATION D'ÉNERGIE FOSSILE

Définir la consommation des véhicules utilisés en propriété ou en location (en litres du carburant ou prix total sur le mois)

Consommation mensuelle d'essence ou de gasoil	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fevr	Mars.	Avril
	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa	litre ou Fcfa
Essence												
Gasoil												

En cas de location : Nom du propriétaire du tracteur : Temps de travail :
(heure/mois)

La nature du règlement du service :

RUBRIQUE 5. TROUPEAU

Composition, mouvement dans le troupeau, soins sanitaires apportés aux animaux et production de lait

Espèces		Composition du troupeau		Mouvements dans le troupeau							Soins apportés aux animaux			Production de lait ou d'oeufs					
		Composition du troupeau au temps T		Entrées			Sorties				autoconsommation	Nom du produit et le prix	Durée opération	sexe et maturité opérateur (H/F/E)	Nr VL /Nb de poules	Lait produit/ jour	Lait vendu /jour	Lait autoconsommé/ jour	Préciser temps pour traite, lieu de vente (H/F/E)
				Naissance (Date)	Achat (Date)	Reçu en Confiage (Date)	Vente (Date)	Vol (Date)	Mort (Date)	Donné en Confiage (Date)	Autoconsommée (Date)								
BDT		Nom bre	Appartenance /confiage ?																
B D E	Bv 0-1 an																		
	Bv 1-3ans																		
	Bovins mâles 3ans+																		
	Bovins femel 3ans+																		
Ovins																			
Caprins																			
Porcins																			
Asins																			
Volaille																			

Conduite aux pâturages Chaque mois, estimer le temps passé par les animaux sur les parcours, les champs de l'exploitation et hors exploitations.

Date : mois et année		Concession			Champ de l'exploitation			Champ hors exploitation			Brousse		
		Nb animaux	Heure départ	Heure de retour	Nb animaux	Entrée champs	Sorties des champs	Nb animaux	Entrée champs	Sorties des champs	Nb animaux	Entrée en brousse	Sorties en brousse
		<i>nb</i>	<i>heure</i>	<i>heure</i>	<i>nb</i>	<i>heure</i>	<i>heure</i>	<i>nb</i>	<i>heure</i>	<i>heure</i>	<i>nb</i>	<i>heure</i>	<i>heure</i>
Bovins de trait													
Bovin d'élé vage	Bv 0-1 an												
	Bv 1-3ans												
	mâles >3 ans												
	Femelles >3 ans												
Ovins													
Caprins													
Porcins													
Asins													
Volaille													

Conduite des animaux en Transhumance

Les animaux sont-ils envoyés en transhumance ?

☐ Oui

☐ Non

Si oui

		Transhumance 1			Transhumance 2			Lieu de destination de la transhumance	
		Nb animaux	Date départ	Date de retour	Nb animaux	Date départ	Date de retour	nom du village Visités	Nbre de bergers pour la garde
		<i>nb</i>	<i>date</i>	<i>date</i>	<i>nb</i>	<i>date</i>	<i>date</i>		
Bovins de trait									
Bovins d'élevage	Bv 0-1 an								
	Bv 1-3ans								
	mâles >3 ans								
	Femelles >3 ans								
Ovins									
Caprins									
Porcins									
Asins									
Volaille									

Alimentation du troupeau

Indiquer les quantités de fourrage, le type d'aliments distribués aux animaux et leur provenance (achat ou provenant des champs de l'exploitation)

Date :		Fourrage 1		Fourrage 2		Fourrage 3		Concentré 1		Concentré 2		CMV 1		Main d'œuvre s'occupant de l'alimentation		
		Nom	Quantité	Nom	Quantité	Nom	Quantité	Nom	Quantité	Nom	Quantité	Nom	Quantité	Nb travailleurs	Heure début	Heure fin
		<i>nom</i>	<i>kg/j</i>	<i>nom</i>	<i>kg/j</i>	<i>nom</i>	<i>kg/j</i>	<i>nom</i>	<i>kg/j</i>	<i>nom</i>	<i>kg/j</i>	<i>nom</i>	<i>kg/j</i>			
Bovins de trait																
Bovin. d'élevage	Bv 0-1 an															
	Bv 1-3ans															
	Mâles >3 ans															
	Femelles >3 ans															
Vache Laitière																
Ovins																
Caprins																
Asins																
Porcins																
Volaille																

Liste de fourrage
Paille de maïs
Paille de sorgho
Paille de riz
Fanes Niébé / d'arachide
Paille naturelle fraîche / sèche
Poids d'angole ou Mucuna

Liste d'aliments concentrés
Tourteaux de soja
Tourteaux de coton
Son de céréales
Drèche locale (dolo)

Complexes minéraux et Vitaminiques (CMV)
Pierre à lécher
Sel de mer
Vitamines

RUBRIQUE 6. AGRICULTURE

Itinéraire technique des cultures

Parcelle n°

Indiquer la main d'œuvre, le temps de travail, le travail en traction, les intrants utilisés et leur transport depuis la concession jusqu'au champ.

Culture	Date	Main d'œuvre						Heure de début	Durée de la pause	Heure de fin	Travail animal		Intrants					
		Famille			Extérieure						Nb animaux	Temps de travail	Nom de l'intrant	Qté d'intrant/ (co) produits	Transport depuis la concession			
		H	F	E	H	F	E								Moyen de transport	Personne	Temps	
	date	Nb de personne						heure	heure	heure	nb	Heure/j	nom	kg, ch, ...	Vélo, moto...	Nb de personne	heure	
Préparation des champs																		
Fumure organique																		
Labour																		
Semis																		
Resemis																		
Herbicides totaux																		
Herbicides sélectifs																		
Désherbage manuel																		
Sarclage																		
Buttage																		
Apport NPK																		
Apport Urée																		
Traitement insecticides																		
Récolte																		

RUBRIQUE 7. FUMURE ORGANIQUE

Indiquer sur le schéma les points de repères, nord, sud, est et ouest et les éléments marquants du paysage
Faire un schéma des installations de production de fumure organique

Itinéraire technique réalisé sur une fosse (compost ; fumière)

Indiquer pour chaque fosse, la main d'œuvre et le temps de travail réalisé, les éléments utilisés sur la fosse (quantité et type d'éléments)

Remplissage de la fosse											
Remplissage de la fosse: ☐ en une fois ☐ à différente période											
Remplissage	Elément n° 1 utilisé	Nb de charrette et type de charrette	Elément n°2 utilisé	Nb de charrette et type de charrette	Famille			Extérieur			Durée du travail
	Nom	Nb ch / type de charrette	Nom	Nb ch / type de charrette	H	F	E	H	F	E	heure
1											
2											
3											
4											
5											
6											
Apport de déjection animale dans la fosse: ☐ Oui ☐ Non											
Nb de charrettes apportées : Date de l'apport :											
Autres éléments apportés	Date de l'apport	Quantité utilisée			Famille			Extérieur			Durée du travail
	date	kg			H	F	E	H	F	E	heure
Burkina Phosphate											
Compost +											
Autres											

Achat, vente de la fumure organique et main d'œuvre utilisée pour la réaliser

Indiquer les quantités de fumure organique donné, vendue ou reçu ou achetée, la main d'œuvre pour le ramassage et le transport de la fumure organique

Type de FO	Date	Achat ou vendu	Quantité de FO achetée ou reçue			Main d'œuvre						Durée/jr			Moyen de transport	Distance
			Nb de charrette	Type charrette	A qui avez-vous achetée ou ou vendu	famille			Extérieur e			Début	Pause	Fin		
	Date	Achat ou vendu	nb	Tomb. pp plateau,...	Type d'UP ou nom	H	F	E	H	F	E	Heure	min	heure	(vélo, charrette...)	km
Achat 1																
Achat 2																
Vente 1																
Vente 2																

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
AVANT-PROPOS	V
RESUME	VIII
ABSTRACT	IX
LISTE DES ABREVIATIONS	X
SOMMAIRE	XI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : UN ENJEU PRIORITAIRE	1
2. UNE CROISSANCE DE LA PRODUCTION AGRICOLE ATTENDUE	1
3. QUELS SYSTEMES IMPLIQUES DANS L'ACCROISSEMENT DE LA PRODUCTION AGRICOLE ?.....	2
4. COMMENT RELEVER LE DEFI DE DURABILITE DU SECTEUR AGRICOLE ?.....	3
5. UNE PRATIQUE AGROECOLOGIE QUI GAGNE DU TERRAIN : L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE	4
CHAPITRE I. REVUE DE LITTERATURE	7
1.1. LE CONCEPT DE DURABILITE DE L'AGRICULTURE.....	7
1.1.1. <i>Limites de l'agriculture conventionnelle issue de la révolution verte</i>	7
1.1.2. <i>Evolution des modes de production agricole après la révolution verte</i>	8
1.2. L'AGROECOLOGIE.....	11
1.2.1. <i>Histoire et évolution du concept d'agroécologie</i>	12
1.2.1.1. AGROECOLOGIE COMME « MOUVEMENT SOCIAL ET POLITIQUE »	13
1.2.1.2. AGROECOLOGIE COMME « PRATIQUES AGRICOLES »	14
1.2.2. <i>Les principes de l'agroécologie</i>	14
1.2.3. <i>Transition agroécologique</i>	15
1.3. LES SYSTEMES MIXTES DE POLYCLTURE-ELEVAGE	16
1.3.1. <i>Les systèmes mixtes de polyculture-élevage</i>	16
1.3.2. <i>Les systèmes intégrés culture-élevage et pisciculture</i>	18
1.4. L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE EN AFRIQUE DE L'OUEST.....	19
1.4.1. <i>Histoire de l'intégration agriculture-élevage</i>	19
1.4.2. <i>Différents niveaux d'analyse de l'intégration agriculture-élevage</i>	21
1.4.2.1. INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE A L'ECHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE	22
1.4.2.2. INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE A L'ECHELLE DU TERRITOIRE	26
1.4.3. <i>Facteurs d'évolution des relations agriculture-élevage</i>	27
1.5. ECOLOGICAL NETWORK ANALYSIS, UNE METHODE D'ANALYSE DE LA DURABILITE DES AGROECOSYSTEMES	29
1.5.1. <i>Histoire de la méthode</i>	29
1.5.2. <i>Méthode Ecological Network Analysis et évolutions</i>	30
1.5.2.1. QU'EST-CE QUE L'ANALYSE INPUT-OUTPUT INITIALE ?	30
1.5.2.2. ADAPTATION DE L'ANALYSE INPUT-OUTPUT A L'ETUDE DES ECOSYSTEMES.....	30
1.5.2.3. DIFFERENTES APPROCHES D'ECOLOGICAL NETWORK ANALYSIS	31
1.5.2.4. ENA POUR L'ANALYSE DE LA STRUCTURE DES ECOSYSTEMES.....	31
1.5.2.5. ENA POUR L'ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES ECOSYSTEMES	32
1.5.2.6. ENA POUR L'ANALYSE DES PROPRIETES EMERGENTES DES ECOSYSTEMES	32
1.5.3. <i>Ecological Network Analysis appliquée aux agroécosystèmes</i>	33

1.5.3.1.	OPPORTUNITE D'ANALYSE DES AGROECOSYSTEMES GRACE A L'ECOLOGICAL NETWORK ANALYSIS	33
1.5.3.2.	APPLICATION DE L'ENA A L'ETUDE DES AGROECOSYSTEMES ET LES DIMENSIONS ETUDIEES	35
1.6.	CONCLUSION PARTIELLE.....	35
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES.....		36
2.1.	ZONE D'ETUDE ET ECHANTILLONNAGE.....	36
2.1.1.	CARACTERISTIQUE DU VILLAGE DE KOUMBIA	36
2.1.1.1.	SITUATION GEOGRAPHIQUE	36
2.1.1.2.	CADRE BIOPHYSIQUE	37
2.1.1.3.	MILIEU HUMAIN	38
2.1.1.4.	PRODUCTIONS AGROPASTORALES.....	39
2.1.2.	ECHANTILLONNAGE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES	40
2.2.	ANALYSE DU FONCTIONNEMENT ENERGETIQUE SELON UNE DIVERSITE DE METHODES ADOPTÉES ..	42
2.2.1.	DEMARCHE GENERALE ADOPTÉE	42
2.2.2.	L'ANALYSE DES PRATIQUES D'IAE.....	43
2.2.3.	L'ANALYSE DES RESEAUX ECOLOGIQUES OU ECOLOGICAL NETWORK ANALYSIS	44
2.2.3.1.	CONCEPTUALISATION DU RESEAU DE FLUX D'ENERGIE BRUTE	44
2.2.3.2.	MODELISATION DU RESEAU DE FLUX D'ENERGIE BRUTE	47
2.2.3.3.	CALCUL DES INDICATEURS D'ENA	48
2.2.4.	L'ANALYSE ENERGETIQUE DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE AVEC L'OUTIL « PLANETE SAVANE »	51
2.2.4.1.	CONCEPTUALISATION DE L'EXPLOITATION AGRICOLE.....	51
2.2.4.2.	INVENTAIRE DES FLUX D'ENERGIE FOSSILE ENTRANT ET D'ENERGIE BRUTE SORTANT	52
2.2.4.3.	COEFFICIENTS ENERGETIQUES BRUTE ET FOSSILE.....	53
2.2.4.4.	CALCUL DES INDICATEURS D'EFFICIENCE ENERGETIQUE FOSSILE	53
2.2.5.	L'ANALYSE PLURI ENERGIE	53
2.2.5.1.	CONCEPTUALISATION DU SYSTEME AGRICOLE ETUDIE	54
2.2.5.1.1.	COMPTABILISATION DE QUATRE FORMES D'ENERGIES.....	54
2.2.5.1.2.	DIVISION DU SYSTEME EN COMPOSANTES.....	54
2.2.5.1.3.	INVENTAIRE DES DIFFERENTS TYPES DE FLUX.....	55
2.2.5.2.	APPLICATION DE L'ANALYSE PLURI-ENERGIE	58
2.3.	COLLECTE DES DONNEES	61
2.3.1.	PHASE D'ENQUETE DES EXPLOITATIONS.....	61
2.3.2.	PHASE DE SUIVI DES EXPLOITATIONS.....	61
2.3.2.1.	PRINCIPES COMMUNS AU SUIVI ET A L'ENQUETE POUR LA COLLECTE DES DONNEES DES QUATRE FORMES D'ENERGIES	62
2.3.2.2.	DISPOSITIF MIS EN PLACE POUR LA COLLECTE DE DONNEES PAR SUIVI DES QUATRE FORMES D'ENERGIES.....	62
2.3.2.3.	PERIODE A CONSIDERER POUR L'EXPLOITATIONS DES DONNEES	66
2.4.	ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNEES.....	67
CHAPITRE III. PERFORMANCE ENERGETIQUE FOSSILE DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE DE L'OUEST DU BURKINA FASO : ROLE DES PRATIQUES D'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE.....		69
1.	INTRODUCTION.....	70
2.	MATERIEL ET METHODE	72
2.1.	LA ZONE COTONNIERE OUEST DU BURKINA FASO	72
2.2.	LES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE ETUDIEES	72
2.3.	ANALYSE DES PRATIQUES D'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE	73
2.4.	ANALYSE DES PROFILS ENERGETIQUES DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE ET DE LEUR EFFICIENCE ENERGETIQUE FOSSILE	73
3.	RESULTATS.....	74
3.1.	UNE DIVERSITE DES PRATIQUES D'IAE MISE EN ŒUVRE DANS LES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE ET SELON LES TYPES D'EXPLOITATIONS	74

3.1.1. <i>La traction animale</i>	75
3.1.2. <i>La production de fumure organique</i>	76
3.1.3. <i>Le stock fourrager</i>	77
3.2. LES PROFILS ENERGETIQUES DE LA DIVERSITE D'EXPLOITATIONS DE POLYCLTURE-ELEVAGE	78
3.3. EFFET DU CHARGEMENT ANIMAL ET DES CHOIX D'ASSOLEMENT SUR L'EFFICIENCE ENERGETIQUE FOSSILE DES EXPLOITATIONS DE POLYCLTURE-ELEVAGE	80
3.4. EFFET DES PRATIQUES D'IAE SUR L'EFFICIENCE ENERGETIQUE FOSSILE DES EXPLOITATIONS DE POLYCLTURE-ELEVAGE	82
2.4.1. <i>L'effet de la traction animale</i>	82
2.4.2. <i>L'effet de la production de fumure organique</i>	82
2.4.3. <i>L'effet de la production et / ou stockage de fourrage</i>	83
4. DISCUSSION	84
4.1. RETOUR SUR LA METHODE ET LES INDICATEURS RETENUS	84
4.2. APPORT DES PRATIQUES D'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE SUR LA DURABILITE DES EXPLOITATIONS DE POLYCLTURE-ELEVAGE	86
4.3. QUELLES VOIES D'AMELIORATIONS DE LA DURABILITE DES EXPLOITATIONS DE POLYCLTURE-ELEVAGE DE L'OUEST DU BURKINA FASO ?	87
5. CONCLUSION	89
CHAPITRE IV. L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE AMELIORE-T-ELLE L'EFFICIENCE, LE RECYCLAGE ET L'AUTONOMIE ENERGETIQUE BRUTE DES EXPLOITATIONS FAMILIALES MIXTES AU BURKINA FASO ?	90
1. INTRODUCTION	92
2. MATERIEL ET METHODES	94
2.1. SITE D'ETUDE ET EXPLOITATIONS FAMILIALES MIXTES	94
2.2. METHODE D'ANALYSE DE RESEAU ECOLOGIQUE OU ECOLOGICAL NETWORK ANALYSIS (ENA)	95
2.3. MODELE CONCEPTUEL DES EXPLOITATIONS FAMILIALES MIXTES	95
2.4. LA COLLECTE DES DONNEES	95
2.5. INDICATEURS DE STRUCTURE, DE FONCTIONNEMENT ET DE PERFORMANCE DES RESEAUX DE FLUX D'ENERGIE BRUTE ISSU DE LA METHODE ENA	97
2.6. INDICATEURS DE STRUCTURE DES EXPLOITATIONS FAMILIALES MIXTES ET DE PRATIQUES D'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE	97
3. RESULTATS	98
3.1. DIVERSITE DE PRATIQUES D'IAE	98
3.1.1. STOCKAGE DE RESIDUS DE CULTURE SELON LES TYPES D'EXPLOITATION	98
3.1.2. PRODUCTION DE FUMURE ORGANIQUE SELON LES TYPES D'EXPLOITATION	100
3.2. EFFET DE LA STRUCTURE DES EXPLOITATIONS ET DES PRATIQUES D'IAE SUR LE RESEAU DE FLUX D'ENERGIE BRUTE	100
3.2.1. EFFET SUR LA STRUCTURE DU RESEAU DE FLUX D'ENERGIE BRUTE	100
3.2.2. EFFET SUR LE FONCTIONNEMENT DU RESEAU DE FLUX D'ENERGIE BRUTE	101
3.2.3. EFFET SUR LES PERFORMANCES DU RESEAU DE FLUX D'ENERGIE BRUTE	104
4. DISCUSSION	105
4.1. INDICATEURS D'ENA	105
4.2. LES PRATIQUES D'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE AMELIORENT LES PERFORMANCES DES EXPLOITATIONS FAMILIALES MIXTES	106
4.3. LES PRATIQUES D'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE RESTENT PERFECTIBLES	107
4.4. LES CHOIX D'APPLICATION DE LA METHODE ENA	108
5. CONCLUSION	109
CHAPITRE V: ROLE DE L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE DANS LA MOBILISATION DES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIE : EVALUATION PLURI-ENERGIE DES EXPLOITATIONS DE POLYCLTURE ELEVAGE DE L'OUEST DU BURKINA FASO	111
1. INTRODUCTION	113

2. METHODOLOGIE	115
2.1. SITE D'ETUDE ET EXPLOITATIONS ETUDIEES.....	115
2.2. CARACTERISATION DE L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE	116
2.3. APPLICATION DE LA METHODE D'ANALYSE PLURI-ENERGETIQUE	117
2.3.1. PRINCIPES DE BASE	117
2.3.2. COLLECTE DE DONNEES.....	118
2.3.3. CALCUL DES COEFFICIENTS ENERGETIQUES	119
2.3.4. CALCUL DES INDICATEURS ENERGETIQUES	120
3. RESULTATS.....	121
3.1. FONCTIONNEMENT ENERGETIQUE DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE	121
3.1.1. PROFILS ENERGETIQUES A L'ECHELLE DE L'EXPLOITATION	121
3.1.2. PROFIL ENERGETIQUE A L'ECHELLE DU SYSTEME DE CULTURE	123
3.1.3. PROFIL ENERGETIQUE A L'ECHELLE DU SYSTEME D'ELEVAGE	124
3.2. EFFET DE L'INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE SUR LE FONCTIONNEMENT ENERGETIQUE DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE.....	126
3.2.1. EFFET DE LA TRACTION ANIMALE SUR LE PROFIL ENERGETIQUE DES EXPLOITATIONS	126
3.2.2. EFFET DE LA PRODUCTION DE FUMURE ORGANIQUE ET DU STOCK FOURRAGER SUR LE PROFIL ENERGETIQUE DES EXPLOITATIONS	129
4. DISCUSSION	130
4.1. IAE EST-ELLE UNE FORME D'INTENSIFICATION ECOLOGIQUE DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE ?.....	130
4.2. ATOUTS ET LIMITES DE LA METHODE PLURI-ENERGIE UTILISEE	134
5. CONCLUSION	135
CHAPITRE VI. DISCUSSION GENERALE.....	137
1. RETOUR CRITIQUE SUR LA MULTIPLICITE DES METHODES ET APPROCHES ADOPTEES	137
1.1. APPROCHE PAR ETUDE DE CAS : ECHANTILLON ET CHOIX DES EXPLOITATIONS ETUDIEES REPRESENTATIVES DE LA DIVERSITE 137	
1.2. METHODES ET APPROCHES UTILISEES : COMPLEMENTARITE, EQUIVALENCE OU PLUS-VALUE ?	138
2. INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE ET PERFORMANCES DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE	140
2.1. DIVERSITE DE FORMES D'IAE ET STRATEGIES ADOPTEES DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE	140
2.2. INTEGRATION AGRICULTURE-ELEVAGE ET PERFORMANCES ENERGETIQUES DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE 142	
2.3. FORMES D'IAE ET PERFORMANCES ENERGETIQUES DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE	144
3. QUELLES SONT LES FORMES D'IAE LES PLUS DURABLES ?.....	145
3.1. EFFET DES PRATIQUES D'IAE SUR LA DURABILITE DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE	145
3.2. PROPOSITIONS POUR RELEVER LES FREINS A LA DURABILITE DES EXPLOITATIONS DE POLYCULTURE-ELEVAGE	147
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	149
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	154
ANNEXE.....	I
TABLE DES MATIERES	XXVIII
LISTE DES TABLEAUX	XXXII
LISTE DES FIGURES	XXXII
LISTE DES ANNEXES.....	XXXIII

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Variables d'appréciation de la durabilité des exploitations de polyculture-élevage.....	34
Tableau II. Procédure de calcul des indicateurs d'intégration agriculture-élevage (Bénagabou et al., 2013).....	44
Tableau III. Indicateurs utilisés dans l'analyse de réseau des flux d'énergie brute dans les agroécosystèmes et leur calcul.....	50
Tableau IV. Indicateurs et équations de calcul des indicateurs de l'analyse pluri-énergie à l'échelle de l'exploitation, des cultures et de l'élevage.....	60
Tableau V. Différents flux mesurés, déclarés ou estimés par forme d'énergie.....	63
Tableau VI. Description des pratiques d'intégration agriculture-élevage dans les différents types d'exploitations de polyculture-élevage étudiées.....	75
Tableau VII. Corrélation entre les variables selon un test de corrélation de Pearson.....	81
Tableau VIII. Indicateurs utilisés dans l'analyse de réseau des flux d'énergie brute dans les agroécosystèmes et leur calcul.....	98
Tableau IX. Caractéristiques structurelles, indicateurs ENA et d'intégration agriculture-élevage.....	99
Tableau X. Caractéristiques structurelles des exploitations de polycultures-élevage étudiées.....	116
Tableau XI. Profils énergétiques à l'échelle des exploitations.....	123
Tableau XII. Profils énergétiques à l'échelle du système de culture.....	124
Tableau XIII. Profils énergétiques à l'échelle du système d'élevage.....	126
Tableau XIV. Indicateurs d'intégration agriculture-élevage dans des exploitations de polyculture-élevage étudiées (Bénagabou et al., 2017).....	129
Tableau XV. Variables d'appréciation de la durabilité des exploitations de polyculture-élevage.....	146
Tableau XVI. Procédure de calcul des flux de biomasse au sein des exploitations familiales mixtes.....	V
Tableau XVII. Protocole mis en place pour le suivi et les mesures des flux d'énergie brute.....	VIII
Tableau XVIII. Liste du contenu énergétique des biomasses utilisées et les teneurs en matière sèche.....	XII
Tableau XIX. Coefficients d'énergie fossile des fertilisants minéraux, produits phytosanitaires et combustibles fossiles.....	XV
Tableau XX. Coefficients d'énergie fossile des graines et résidus des principales cultures.....	XVI
Tableau XXI. Coefficients d'énergie fossile des graines et résidus des cultures secondaires.....	XVII
Tableau XXII. Coefficients d'énergie fossile des concentrés alimentaires.....	XVII
Tableau XXIII. Coefficients d'énergie fossile du matériel.....	XVIII
Tableau XXIV. Coefficients d'énergie fossile des bâtiments.....	XVIII
Tableau XXV. Répartition par classe des travaux suivant le gradient de pénibilité.....	XX

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Diversité des modèles de production agricole (adapté de Trabelsi, 2017).....	9
Figure 2. Système mixte polyculture-élevage intégré (d'après Moraine et al., 2014) versus système juxtaposé.....	17
Figure 3. Systèmes intégrés culture-élevage et pisciculture (à partir de Ali, 2001).....	19
Figure 4. Principales interactions dans les systèmes mixtes polyculture-élevage (d'après Herrero et al., 2010).....	21
Figure 5. Diversité des modes de production de fumure organique au Mali-Sud (d'après Blanchard et al., 2013).....	25
Figure 6. Relations agriculture-élevage sur le territoire (d'après Dugué et al. 2004).....	27
Figure 7. Carte du territoire du village de Koumbia.....	36
Figure 8. Hauteur d'eau et nombre de jours de pluie entre 2005 et 2014 dans la station pluviométrique de Koumbia (source UDPC).....	37
Figure 9. Démarche générale adoptée pour collecter et analyser les données.....	42
Figure 10. Modèle conceptuel des flux d'énergie brute d'une exploitation familiale mixte dans l'ouest du Burkina Faso.....	46
Figure 11. Réseau d'un système à deux compartiments I et J, leur variation de stock (XI et XJ), les flux internes (FIJ et FJI), les flux sortant (YOI et YOJ) et entrant (ZIO et ZJO). Source : (Finn, 1980).....	48

Figure 12. Matrice construite à partir des flux entrants, sortants, internes et des variations de flux (H : compartiment ; FO : fumure organique ; Xi : variation de stock).....	48
Figure 13. Schéma conceptuel du système énergétique des flux entrées-sorties d'une exploitation agricole (Bénagabou, 2011)	52
Figure 14. Quatre modèles conceptuels des flux d'énergie brute, fossile, liée au travail humain et animal et solaire.....	56
Figure 15. Cinq étapes pour appliquer l'analyse pluri-énergie.....	59
Figure 16. Profil énergétique et échange de flux de biomasses par l'intégration agriculture-élevage dans une exploitation (1) d'agriculteur, (2) d'agro-éleveurs et (3) d'éleveurs à l'Ouest du Burkina Faso.....	79
Figure 17. Indice global d'intégration agriculture-élevage (IG) et Efficience énergétique fossile (EEF) dans les exploitations de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso.....	84
Figure 18. 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.....	103
Figure 19. 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.....	104
Figure 20. Consommation d'énergie du travail en fonction de la consommation d'énergie fossile et de l'efficience énergétique à l'échelle de l'exploitation, du système de culture et d'élevage.....	128

LISTE DES ANNEXES

Annexe i.A - Poster 3R 2013. 20 ^{ème} présenté à paris les 4-5 décembre 2013.....	II
Annexe i.B – Communication au FSD.....	III
Annexe 2. Collecte des données et calcul des coefficients d'énergie.....	V
Annexe 2A. Collecte de données d'énergie brute.....	V
Annexe 2.B. Coefficients d'énergie brute	XII
Annexe 2.C. Coefficients d'énergie fossile.....	XIV
Annexe 2.D. Coefficients d'énergie du travail.....	XIX
Annexe 3. Fiche de suivi des exploitations.....	XXII