

**Rôle des caprins en pâturage libre dans le recyclage de l'azote
et l'intensification agroécologique des agroécosystèmes tropicaux:
étude de cas en République Démocratique du Congo**



Alain Ndona Nzey

COMMUNAUTÉ FRANÇAISE DE BELGIQUE
UNIVERSITÉ DE LIÈGE – GEMBLoux AGRO-BIO TECH

**Rôle des caprins en pâturage libre dans le recyclage de
l'azote et l'intensification agroécologique des
agroécosystèmes tropicaux:
étude de cas en République Démocratique du Congo**

Alain NDONA NZEY

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en
sciences agronomiques et ingénierie biologique

Promoteurs : Professeur Jérôme Bindelle
Professeur Bienvenu Kambashi
Année civile : 2026

À vous, mes enfants Karol, Winner, Mi Claire et Xaverin NDONA,

Pour votre remarquable capacité de résilience, pour avoir supporté pendant de longues années un père trop souvent absent sans jamais le juger.

Je vous dédie cette thèse, fruit de nos sacrifices communs.

Abstract

Goats are the most widely raised small ruminants in family farming systems across sub-Saharan Africa (SSA), largely because they are easy to manage, even for low-income households. Within the framework of integrated crop-livestock systems (ICLS), aimed at reducing dependence on external inputs, this thesis investigated the role of goats in tropical agroecosystem functioning, particularly their contribution to nutrient transfer among agroecosystem compartments exploited under free-range grazing.

A mixed-methods approach was used to assess the capacity of goats to mobilize nutrients through forage intake and transfer them via excreta to cultivated land. The methodology combined exploratory surveys, direct grazing observations coupled with GPS tracking, laboratory analyses of forage and goat excreta, remote sensing, geographic information systems (GIS), and nitrogen flow modelling.

The results showed that free-ranging goat farming is the dominant farming system (72%). Goats exploit highly fragmented agroecosystems composed of diverse compartments, including natural savannas and grasslands (36.4-69.7%), residues supply areas (household yards and bare areas containing crop residues or domestic waste: 9.8-46.7%), cultivated lands (6.1-14.8%), fallows (2.7-12.5%), and green hedgerows (0.1-5.4%). These agroecosystem compartments provide diverse forage resources, with 57 species identified as consumed by goats. Forage quality and availability varied seasonally.

Among the identified forage species, grasses represented 17%, legumes 9%, and the remaining 74% belonged to 31 different botanical families. Range lands and agricultural lands (cultivated lands and fallows) were the most diverse compartments in forage species and contributed most to goat diets ($36 \pm 13\%$ and $38 \pm 9\%$ of dry matter intake, respectively).

Despite the socio-economic and technical advantages of free-range goat farming, the management practices currently observed do not support effective agroecological intensification within ICLS, as nitrogen balances remained negative in both agricultural lands and range lands compartments.

Under these conditions, nutrient transfer to cultivated lands remains limited. To address this issue, several herd and manure management scenarios were simulated to improve nitrogen balances in agricultural land compartments. These scenarios included increasing goat confinement time, applying bedding material in night shelters, restricting goat access to cultivated lands, and combining these management strategies.

The simulations showed that combining goat confinement, bedding application, and restricted access to cultivated lands significantly improved nitrogen balances in agricultural land compartments across seasons, with slightly positive balances recorded during the dry season.

This thesis demonstrates that improved goat herd and manure management can serve as an effective lever for agroecological intensification. However, these management scenarios should be validated under real farming conditions, across multiple sites and animal categories, while also accounting for nitrogen inputs and losses from other sources.

Résumé

Les caprins sont les petits ruminants les plus élevés dans les exploitations familiales en Afrique subsaharienne (SSA), car ils sont faciles à entretenir, même par les ménages avec de faibles revenus.

Dans une perspective d'intégration agriculture-élevage (IAE) pour une intensification agroécologique susceptible de réduire le recours aux intrants extérieurs de ces exploitations familiales, cette thèse a analysé le rôle des caprins dans le fonctionnement des agroécosystèmes tropicaux, notamment le transfert des nutriments entre les compartiments exploités par les chèvres en pâturage libre.

Une méthodologie mixte a été utilisée pour vérifier la capacité des chèvres à mobiliser les nutriments par leur consommation fourragère et à les transférer via les déjections, vers les compartiments des terres cultivées de l'agroécosystème qu'elles exploitent. Cette méthodologie mixte a consisté en la combinaison des enquêtes exploratoires, des observations directes accompagnées de pistage GPS au pâturage, des analyses au laboratoire des fourrages consommés et des déjections déposées, de la télédétection, du SIG et de la modélisation de flux d'azote.

Les résultats montrent que la majorité des élevages de chèvres (soit 72%) sont en pâturage libre. Ces dernières exploitent un agroécosystème spatialement fragmenté, avec une diversité des compartiments, comprenant les savanes et herbages naturels (36,4-69,7%), les cours des parcelles/zones dénudées avec les résidus ou déchets ménagers (9,8-46,7%), les terres cultivées (6,1-14,8%), les jachères (2,7-12,5%) et les haies vives (0,1-5,4%). Ces compartiments sont diversifiés en plantes fourragères réellement consommées par les chèvres, avec 57 espèces identifiées, de qualité nutritionnelle variable en fonction des saisons.

Parmi ces espèces, les graminées (17%) sont majoritaires, suivies des légumineuses (9%) et le reste (74%), comprenant un conglomerat de 31 familles botaniques différentes. Les savanes et les terres agricoles (jachères et terres cultivées) sont les compartiments les plus diversifiés en espèces fourragères et contribuent à l'essentiel de l'alimentation des chèvres (jusqu'à respectivement $36 \pm 13\%$ et $38 \pm 9\%$ de matières sèches ingérées).

Malgré les avantages socioéconomiques et techniques des élevages en pâturage libre des chèvres, les pratiques locales telles qu'observées ne permettent pas une meilleure intensification agroécologique dans une IAE, car les bilans d'azote sont négatifs dans les compartiments « terres agricoles et savanes/herbages naturels ».

Dans ces conditions, le transfert de fertilité vers les terres agricoles est fortement limité. Pour cette raison, les simulations des scénarios de gestion de troupeau et des déjections ont été élaborées pour améliorer le bilan de l'azote dans les terres agricoles. Ces scénarios sont basés sur l'augmentation du temps de confinement des chèvres, l'application de litière dans leur abri de nuit, la restriction de leur accès aux terres cultivées. Il ressort des simulations de gestion que la combinaison de ces scénarios contribue à améliorer très significativement le bilan d'azote dans les terres agricoles, quelle qu'en soit la saison, avec des valeurs légèrement positives en saison sèche.

Cette thèse a démontré grâce à ces simulations, qu'une bonne stratégie de gestion de troupeau des chèvres et de leurs déjections, est un levier d'intensification agroécologique dans un système d'intégration agriculture-élevage. Cependant, ces scénarios de gestion doivent être testés dans les conditions réelles de terrain, sur toutes les catégories animales et dans plusieurs sites, pour valider leur efficacité, en tenant aussi compte des apports et pertes d'azote d'autres sources potentielles.

Remerciements

« Gloire au Créateur de toutes choses. Tout est par Sa Grâce ! »

Au terme de ce parcours doctoral, j'exprime ma profonde gratitude à toutes les personnes, institutions et organisations qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce projet, notamment l'ARES et le CAVTK. Cet accomplissement porte à jamais l'empreinte de votre soutien.

Mes sentiments de reconnaissance vont d'abord aux Professeurs Jérôme Bindelle et Bienvenu Kambashi, qui ont cru en moi en acceptant d'encadrer ce projet de thèse en qualité de promoteurs.

Je remercie également tous les Professeurs membres du comité de thèse pour leurs précieuses contributions tout au long de ma formation doctorale, ainsi que dans les différentes productions scientifiques réalisées. Je pense tout particulièrement aux Professeurs Yves Beckers, Charles-Henri Moulin et Marc Dufrêne. Vos expertises scientifiques respectives ont largement contribué à façonner le chercheur que je suis devenu.

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres du jury, et plus particulièrement au Professeur Nicolas Gengler, président du jury, ainsi qu'au Professeur Gilles Colinet et Dr Caroline Battheu-Noirfalise, pour avoir accepté de participer à l'évaluation de mon parcours doctoral.

Je remercie aussi l'ensemble des membres de l'unité « Sciences animales » ainsi que tous les collègues doctorants, dont la collaboration, la disponibilité et l'esprit de convivialité ont permis de créer un environnement de travail serein et propice à l'aboutissement de ce parcours.

Mes sentiments de reconnaissance vont également à tous mes nombreux amis et connaissances, avec une pensée particulière pour le Dr Dale Rachmeler et Mme Elise Pinnars du The Vetiver Network International, pour leur accompagnement et leur soutien constants.

J'exprime également ma profonde gratitude à mes nombreux frères, sœurs, cousins, cousines, nièces et neveux, dont l'amour, l'affection, l'attachement et la générosité ont constitué une source inestimable de motivation tout au long de cette aventure.

J'adresse également mes sincères remerciements à tous les éleveurs de chèvres qui ont accepté de mettre leurs troupeaux à disposition pour la collecte des données. Leur collaboration a été essentielle à la réalisation de cette étude.

Enfin, à vous tous dont les noms ne peuvent être cités ici, mais qui avez contribué de près ou de loin à cette réussite et préférez demeurer dans l'ombre, j'adresse mes plus sincères remerciements.

À vous tous, je dis : **UN GRAND MERCI !**

Table des matières

Abstract.....	6
Résumé	8
Remerciements	10
Table des matières	12
Liste des figures.....	15
Liste des tableaux	16
Liste des abréviations	17
Chapitre 1 Introduction générale	19
1.1. Contexte et problématique de l'étude	21
1.2. Agroécologie : concept, principes et pratiques	24
1.2.1. Rapprochement entre les principes de l'agroécologie et les objectifs de développement durable.....	28
1.2.2. Intégration agriculture et élevage: une pratique d'intensification agroécologique entre les compartiments animal et végétal dans un agroécosystème.....	31
1.2.3. Recyclage des nutriments, clé de l'intensification écologique des interactions entre composantes animales et végétales de l'agroécosystème	32
1.3. L'élevage des caprins et son potentiel dans un processus d'intensification agroécologique.....	33
1.3.1. Historique et diffusion des caprins en Afrique subsaharienne.....	34
1.3.2. Importance et choix de l'élevage des caprins chez les populations rurales en ASS	34
1.3.3. Les caprins dans le cycle de l'azote des agroécosystèmes	37
Chapitre 2 Questions, hypothèses, objectifs et stratégies de recherche	46
2.1. Questions de recherche.....	48
2.2. Hypothèses et objectifs de recherche.....	48
2.3. Stratégie et schéma méthodologique de la recherche	49
Chapitre 3 Typologie des élevages des caprins	52
Abstract.....	54
3.1. Introduction.....	55

3.2. Materials and methods.....	56
3.2.1. Study area	56
3.2.2. Sampling and data collection.....	57
3.2.3. Statistical analysis	58
3.3. Results	60
3.3.1. Identification of agroecosystem components and their spatial structure.	60
3.3.2. Goat farmer practices that can promote ecological intensification.....	61
3.3.3. Characterisation of the traditional goat farmers	64
3.3.4. Typology of goat farming.....	66
3.4. Discussion	68
3.5. Conclusion.....	73
3.6. Appendix chapter 3.....	75
3.7. References	78
Chapitre 4 Cartographie, suivi et évaluation des consommations fourragères des chèvres dans les agroécosystèmes exploités	87
Abstract	89
4.1. Introduction	90
4. 2. Materials and methods.....	92
4.2.1. Study area	92
4.2.2. Experimental design	93
4.2.3. Data collection and processing.....	94
4.2.4. Forage sample analyses	98
4.2.5. Statistical analysis	98
4.3. Results	99
4.4. Discussion	109
4.5. Conclusions	113
4.6. References	115
Chapitre 5 Flux d'azote dans les compartiments de l'agroécosystème exploités par les chèvres en pâturage libre	127
5.1. Introduction	130
5.2. Materials and Methods	131

5.2.1. Study area	131
5.2.2. Experiment design	133
5.2.3. Data collection	137
5.2.4. Statistical Analyses	144
5.3. Results	145
5.4. Discussion.....	149
5.5. Conclusion	153
5.6. Reference	155
Chapitre 6 Discussion générale	162
6.1. Introduction	163
6.2. Structure spatiale, caractérisation et fonctionnement des agroécosystèmes exploités	165
6.2.1. Structure spatiale et caractérisation	165
6.2.2. A l'échelle de la parcelle: fragmentation, typologie d'élevage et alimentation	166
6.2.3. A l'échelle du village/territoire: fragmentation, pâturage libre et alimentation	169
6.3. Elevage des caprins en pâturage libre et flux d'azote dans un agroécosystème fragmenté	171
6.3.1. Dans les conditions habituelles des pratiques d'élevage des paysans (SC0).....	172
6.3.2. Dans les conditions des pratiques améliorées (de CS1-SC7)	172
6.4. Durabilité agronomique, environnementale et économique de l'élevage caprin en IAE	174
6.5. Leviers de gestion et effets attendus sur l'IAE-caprin dans un agroécosystème fragmenté à l'échelle du territoire.....	175
Chapitre 7 Conclusions générales et perspectives	179
References	182

Liste des figures

Figure 1-1. <i>La dimension agricole et environnement de l'agroécologie</i>	25
Figure 1-2. <i>Différentes dimensions de la compréhension du concept agroécologie</i>	26
Figure 1-3: <i>La dimension transdisciplinaire de l'agroécologie</i>	27
Figure 1-4 : <i>Contribution des principes agroécologiques dans les ODD</i>	29
Figure 1-5. <i>Valeurs en azote, phosphore et potassium de fumier et compost des chèvres et vaches</i>	37
Figure 1-6. <i>La chèvre et le cycle d'azote dans un agroécosystème</i>	39
Figure 2-1 : <i>Stratégie et schéma méthodologique de la recherche</i>	50
Figure 3-1. <i>Study area</i>	57
Figure 3-2. <i>Agroecological intensified model of interactions</i>	61
Figure 3-3. <i>Graph of variables and Graph of the variables' modalities</i>	64
Figure 3-4. <i>Projection of the dendrogram of farmers on the factor map</i>	66
Figure 4-1. <i>Study area</i>	93
Figure 4-2 a. <i>Land use and land cover maps illustrating the spatial configuration of compartment of foraging area (CoFA)</i>	100
Figure 4-2 b. <i>Land use and land cover maps illustrating the spatial configuration of compartment of foraging area (CoFA)</i>	101
Figure 4-3. <i>The importance of each compartment of foraging area</i>	108
Figure 5-1. <i>Study area</i>	132
Figure 5-2 a. <i>Land use maps of the spatial configuration of the mosaic of patches of CoFA within the agroecosystems exploited by free-ranging goats</i> .134	
Figure 5-2 b. <i>Land use maps of the spatial configuration of the mosaic of patches of CoFA within the agroecosystems exploited by free-ranging goats</i> .135	
Figure 5-3. <i>Conceptual model of N fluxes mediated by a goat within agroecosystem compartments</i>	137
Figure 5-4. <i>Correlation matrix showing the variables chosen for simulation in the different scenarios</i>	141
Figure 6-1. a et b. <i>Illustrations de fragmentation de l'agroécosystème à l'échelle des parcelles</i>	168
Figure 6-2. <i>Illustrations de fragmentation de l'agroécosystème à l'échelle du territoire</i>	170

Liste des tableaux

Tableau 1-1. Les effectifs des principales espèces d'élevage en RDC.....	34
Tableau 1-2. Avantage comparatif de l'élevage des chèvres	36
Tableau 1-3. Principales formes de l'azote dans le cycle.....	40
Table 3-1. Variables of goat farmers, used for MCA.	58
Table 3-2. Goats farmers' practices promoting nutrient flow	62
Table 3-3. Characterisation of the classes	67
Tableau 3-4. Profil des éleveurs des caprins	75
Table 4-1. Characterisation of CoFA and agroecosystem landscape	102
Table 4-2. a. Forage consumed by goats at Ngeba and Kikola sites	103
Table 4-2. b. Forage consumed by goats at Masamuna and Mosango sites	105
Table 4-3. Goat's daily diet quantity and quality across seasons and sites	107
Table 5-1. Extent of different compartments exploited (CoFA)	136
Table 5-2. Base line scenario (SC0) and seven others (SC1-SC7).....	143
Table 5-3. Dynamics of nitrogen within each compartment.	145
Table 5-4. Summary of nitrogen (N) fluxes across CoFA categories	147
Tableau 6-1. Leviers de gestion et effets attendus sur l'ICLS basé sur les caprins.....	176

Liste des abréviations

ONU	: Organisation des Nations Unies
ASS/SSA	: Afrique subsaharienne
RDC	: République Démocratique du Congo
UNESCO	: Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
ODD	: Objectifs de développement durable
SDGs	: Sustainable development goals
IAE	: Intégration agriculture et élevage
RDC/DRC	: République Démocratique du Congo
ICLS	: Integrated crop and livestock system
GPS	: Global Positioning System
SIG	: Système d'information géographique
Ha	: hectare
DMI	: Dry matter intake
DM	: Dry matter
SC	: Scénario
SHDI	: Shannon's diversity index
PB	: Protéines brutes
CP	: Crude protein
NDF	: Neutral detergent fibre
ADF	: Acid detergent fibre
Digest	: Digestibilité

FAO	: Food and Agriculture Organization
IVC	: International Vegetation Classification
MCA	: Multiple correspondence analysis
HAC	: Hierarchical ascending classification
NGOs	: Nongovernmental Organization
CoFA	: Compartments of the foraging area
UAS	: Unmanned aerial system
WGS	: World Geodetic System
UTM	: Universal Transverse Mercator
LULC	: Land use and land cover
AOAC	: Association of Official Analytical Chemists
ANOVA	: Analysis of variance
ART	: Aligned rank transform
DS	: Dry season
RS	: Rainy season
RLand	: Range land
RSA	: Residue supply area
GrHedge	: Green hedgerow
ALand	: Agricultural land
ENA	: Ecological Network Analysis
MEA	: Millennium Ecosystem Assessment
GES	: Gaz à effet de serre

Chapitre 1

Introduction générale

1.1. Contexte et problématique de l'étude

La population mondiale connaît une croissance continue. Le rapport de l'Organisation des Nations Unies (ONU, 2015), mentionne que cette tendance continuera jusqu'à atteindre environ 9 milliards d'habitants d'ici 2050. Plusieurs études confirment que cette pression démographique s'accompagne inévitablement de l'accroissement de la demande alimentaire, afin de répondre aux besoins de cette population en constante augmentation (Opio et al., 2011; Bénagabou et al., 2017). Par conséquent, les écosystèmes sont soumis à des pressions anthropiques croissantes, provoquant leur dégradation qui s'avère, parfois irréversible (Foley et al., 2011; Barnosky et al., 2012; Cui et al., 2018; Bourban, 2019; Orina et al., 2024).

Assurer un équilibre entre la production alimentaire et la préservation des écosystèmes, constitue l'un des principaux défis du système alimentaire mondial. Il s'avère donc nécessaire de développer des systèmes agricoles capables d'assurer simultanément, la sécurité alimentaire et la préservation des ressources naturelles (Blake & Nicholson, 2004; Blanchard et al., 2012; Bénagabou et al., 2017).

Dans les pays d'Afrique subsaharienne (ASS) en général et en République Démocratique du Congo (RDC) en particulier, les milieux ruraux et péri-urbains constituent des pôles majeurs de production agricole, à partir desquels de grandes agglomérations à forte concentration de population sont approvisionnées en denrées alimentaires. La compréhension et la maîtrise des systèmes des productions agricoles dans ces milieux ruraux et péri-urbains représentent ainsi un levier essentiel pour la recherche, en vue de renforcer la durabilité des systèmes alimentaires, depuis la production à la ferme jusqu'à la consommation.

Cependant, les pratiques agricoles traditionnelles, tant en productions animales (élevages) que végétales (surtout les cultures vivrières) dans les milieux paysans de la plupart des pays de l'ASS en général, et de la RDC en particulier, ne permettent pas de répondre durablement à l'augmentation de la production alimentaire tout en préservant les écosystèmes exploités.

Un exemple parmi tant d'autres, est l'agriculture itinérante sur brûlis. Ce système est considéré comme le modèle de gestion et de préparation des champs le plus répandu en Afrique subtropicale humide. Cependant, cette variante de l'agriculture extensive a beaucoup d'impacts négatifs sur l'environnement (Boval et al., 2017; Mishra et al., 2021), car les paysans ouvrent l'espace à cultiver par le défrichage et le feu. Ces espaces cultivés sont

exploités pendant quelques années (3 à 5 ans) jusqu'au déclin de leur fertilité. Ils sont ensuite abandonnés ou laissés en friche ou en jachère pendant un certain nombre d'années pour la restauration de leur fertilité. La durée de cette jachère dépendra de la disponibilité d'autres parcelles exploitables. Lorsque d'autres terres sont disponibles, la période de jachère peut être prolongé (plus de 4 années par exemple) et permettre dans ce cas, la restauration naturelle de la fertilité des sols. Dans le cas contraire, cette jachère est plus courte (1 à 2 ans) et pourrait ne pas être en mesure de restaurer cette fertilité de manière efficace.

Plus encore, certaines pratiques agricoles, notamment la mise en place inadéquate des billons et des buttes sur des terrains en pente et ne respectant pas les courbes de niveau, peuvent également exacerber les dégradations des sols, entraînant inévitablement leur érosion et accélérant la perte de leur fertilité. Ces diverses formes des dégradations des sols induisent ensuite une baisse des productions alimentaires dans les milieux ruraux. Les populations locales pourraient ainsi se retrouver en situation de vulnérabilité accrue et d'insécurité alimentaire et nutritionnelle, qui pourrait encore s'aggraver sous les effets du réchauffement climatique.

L'Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture (UNESCO, 2009) a déjà signalé que, d'une manière générale, l'agriculture devenait de moins en moins capable de s'adapter aux défis environnementaux auxquels la planète fait face, aussi bien en termes de réchauffement climatique suite à l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone qu'elle favorise, que par la perte rapide des matières organiques et de la fertilité des sols, voire même des érosions qu'elle occasionne, compromettant ainsi une exploitation durable des agroécosystèmes.

Les modèles de production traditionnels extensifs (peu productifs et ne recourent pas, voire peu aux intrants extérieurs) et les modèles conventionnels modernes (productivistes, à rendements élevés, recourent à d'importantes quantités d'intrants extérieurs) ont tous un point commun : « les impacts négatifs à court, moyen et long terme sur l'environnement » (Ryschawy et al., 2014; Chaudhary et al., 2023).

Critiquer les mauvaises pratiques agricoles et leurs impacts négatifs sur l'environnement et la durabilité de l'agriculture, est aujourd'hui, un point de vue partagé par de nombreux chercheurs (Bonaudo et al., 2014; Rahmann et al., 2017).

Dans ce contexte, l'enjeu n'est plus uniquement d'augmenter les productions agricoles, mais également de concevoir des systèmes capables de maintenir leurs fonctions écologiques; c'est-à-dire, préserver les écosystèmes tout en

répondant aux besoins alimentaires des populations. Cette préoccupation a favorisé l'émergence d'autres approches, parmi lesquelles l'agroécologie occupe aujourd'hui une place centrale.

Contrairement à l'intensification agroécologique basée sur les processus écologiques, l'intensification agricole de l'agriculture moderne, repose sur l'utilisation massive des intrants externes, la spécialisation des systèmes de production (la monoculture par exemple) et l'exploitation excessive des ressources naturelles. Elle entraîne la dégradation des sols, la pollution des eaux, l'érosion de la biodiversité et une réduction de la capacité de résilience des exploitations agricoles face aux perturbations environnementales (Tilman et al., 2002; Foley et al., 2011; Tittonell, 2014). Face à ces limites, beaucoup de recherches sur les agroécosystèmes visent la conciliation entre productivité agricole et préservation des ressources naturelles (Rahmann et al., 2017; Ciaccia et al., 2019).

Un agroécosystème est un écosystème modifié et géré par l'homme pour produire des biens agricoles, tout en fonctionnant selon des processus écologiques similaires à ceux des écosystèmes naturels (Altieri, 1999; Gliessman, 2015). Il comprend toutes les composantes biotiques (cultures, animaux, microorganismes, végétation associée) et abiotiques (sol, eau, climat) ainsi que les interactions entre elles, fournissant harmonieusement, une diversité de services écologiques et écosystémiques.

Bien que la limite entre ces derniers soit confuse, il est cependant largement admis que les services écologiques sont centrés sur les processus et fonctions biologiques, physiques et chimiques qui assurent le fonctionnement des écosystèmes. Ils correspondent aux mécanismes écologiques qui permettent le maintien de la vie et la production de biens ou de bénéfices potentiels. Ces services écologiques incluent notamment le recyclage des nutriments, la décomposition de la matière organique, la formation des sols, la fixation biologique de l'azote, la pollinisation, la régulation naturelle des ravageurs ou encore le stockage du carbone (Daily, 1997; de Groot et al., 2002).

Par contre, les services écosystémiques correspondent aux bénéfices que les sociétés humaines tirent de ces processus. Ce concept est apparu dans une perspective davantage anthropocentrée (de Groot et al., 2002 ; Fisher et al., 2009). Le Millennium Ecosystem Assessment (MEA) distingue quatre grandes catégories des services écosystémiques (MEA, 2005): (1) les services d'approvisionnement (aliments, fibres, bois, eau, etc.), (2) les services de régulation (régulation du climat, pollinisation, contrôle biologique des ravageurs, purification de l'eau), (3) les services culturels (valeurs récréatives,

spirituelles et éducatives) et (4) les services de soutien ou d'entretien (formation des sols, cycles biogéochimiques, production primaire).

Toutefois, un même service peut être à la fois écologique et écosystémique selon le prisme de sa considération. Ainsi par exemple, lorsque la pollinisation est considérée comme un mécanisme biologique réalisé par les insectes, elle relève d'un service écologique; lorsqu'elle est envisagée à travers son effet sur les rendements agricoles et la sécurité alimentaire, elle devient un service écosystémique.

L'analyse des agroécosystèmes doit donc mettre l'accent sur les flux de matière et d'énergie, les cycles biogéochimiques, les interactions biologiques et les mécanismes de régulation écologique qui influencent leur fonctionnement et leur durabilité (Conway, 1987; Gliessman, 2014).

Ainsi donc, contrairement à la simple intensification agricole, qui dépend principalement de l'augmentation des intrants externes, l'intensification agroécologique vise à renforcer les différents services écologiques et écosystémiques des agroécosystèmes, pour améliorer la productivité, la résilience et la durabilité des systèmes de production (Cassman, 1999; Doré et al., 2011; Bommarco et al., 2013).

Cette approche repose sur l'utilisation et l'optimisation des services écologiques, comme le recyclage des nutriments, la fixation biologique de l'azote, les interactions entre les plantes et les animaux, la régulation biologique des parasites, l'amélioration de la fertilité des sols et le maintien de la biodiversité fonctionnelle (Doré et al., 2011; Tittonell, 2023; Dumont et al., 2021).

L'agroécologie constitue par conséquent, un cadre scientifique et pratique permettant de mieux analyser et cerner la transition des systèmes intensifs de production agricole vers des systèmes beaucoup plus agroécologiques.

1.2. Agroécologie : concept, principes et pratiques

L'agroécologie réfère, d'une manière simple, à une agriculture respectueuse des femmes et des hommes et de l'environnement, c'est-à-dire préservant l'équilibre des interactions entre les activités agricoles, la diversité des êtres vivants et la diversité des milieux de vie (Chaudhary et al., 2023).

Les éléments et leur interaction dans un agro-système

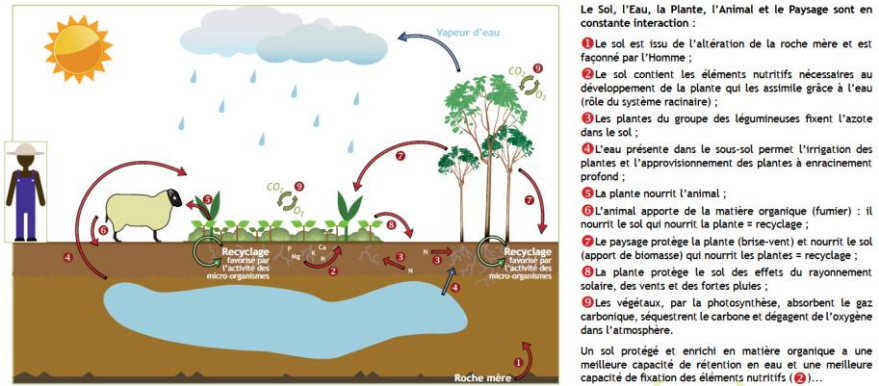


Figure 1-1. La dimension agricole et environnementale de l'agroécologie, tirée de Altieri & Nicholls (2020).

Le terme « agroécologie » fait aujourd'hui l'objet de multiples interprétations, bien que ce concept ait émergé dès le début du 20^e Siècle (Wezel et al., 2009). L'agroécologie a commencé à se populariser depuis le début des années 1980, avec la mise en exergue de la notion « d'agriculture durable », comme alternative aux impacts négatifs sur l'environnement, causés par le modèle d'agriculture conventionnelle industrielle, hérité de la révolution verte, caractérisé entre autres par l'utilisation d'importantes quantités des intrants chimiques, destinés à substituer les processus naturels de restauration de la fertilité des sols (Gliessman et al., 1981, 2017; Wezel et al., 2009) et (Altieri & Anderson, 1986; Altieri, 1999; Chaudhary et al., 2023; Altieri et al., 2024).

Toutes choses égales par ailleurs, l'agroécologie est d'abord considérée par ces auteurs comme étant une discipline scientifique, placée au carrefour des sciences agronomiques et écologiques. C'est pourquoi ils la définissent comme étant: « *une approche de la production agricole permettant d'assurer des rendements de manière durable, par le recours à des techniques de gestion écologiquement saines. Ici, les stratégies sont basées sur des concepts écologiques, de telle sorte que les formes de gestion aboutissent à un recyclage optimal des nutriments et de la matière organique, à des flux énergétiques fermés, à un équilibre des populations d'espèces nuisibles et à une augmentation de l'utilisation multiple du paysage* ».

L'agroécologie est donc considérée comme étant « *l'application des principes de l'écologie à l'étude, à la conception et à la gestion durable des agrosystèmes* » (Gliessman, 1998; Altieri, 2013). Dans cette optique, Gliessman (2007) propose que les approches agroécologiques revisitent les modèles de production agricole actuels, en s'inspirant des concepts et principes tirés de l'écologie, afin de répondre à la fois

au besoin d'optimisation de la productivité par le renforcement de la capacité de résilience aux changements climatiques d'une part, et d'autre part à la maximisation des services écologiques susceptibles d'être fournis par les agroécosystèmes et à la limitation des impacts négatifs, en particulier par un moindre recours et une moindre dépendance aux intrants chimiques. Ainsi, l'approche agroécologie prône donc la diversité des espèces cultivées ainsi qu'un ensemble de pratiques agricoles dont la synergie imite les processus écologiques tels qu'observés dans la nature (Altieri & Nicholls, 2020).

Avec l'évolution du concept d'agroécologie, l'approche transdisciplinaire a émergé, incluant les dimensions « sociales et économiques » aux dimensions « production agricole et préservation environnementale » (Wezel et al., 2009; Gallardo-López et al., 2018; Ciaccia et al., 2019; Altieri & Nicholls, 2020; Chaudhary et al., 2023), qui fait ressortir trois piliers sur lesquels reposent l'agroécologie, notamment les piliers « scientifique (1) », « pratiques agricoles (2) » et « mouvement social ou politique (3) ».

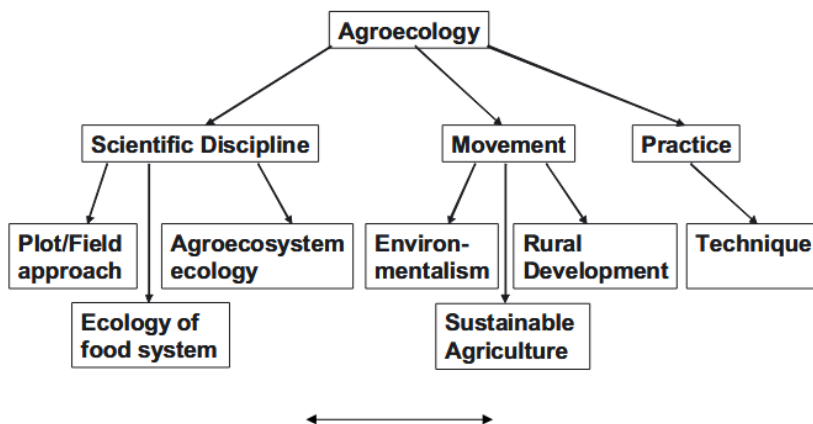


Figure 1-2. Différentes dimensions de la compréhension du concept d'agroécologie selon Wezel et al., (2009).

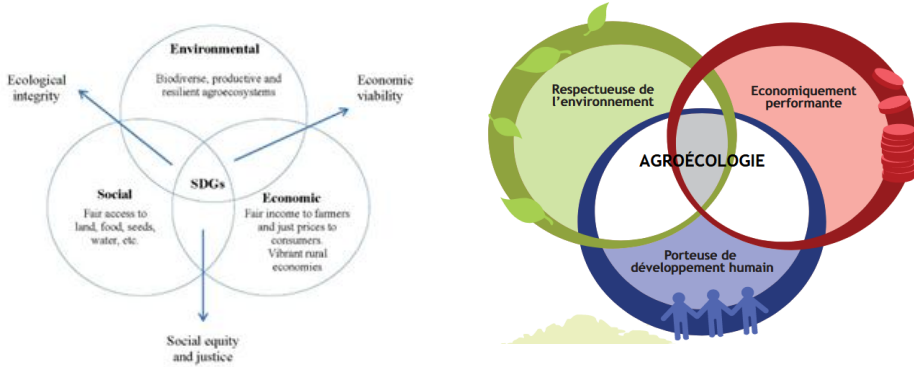


Figure 1-3: La dimension transdisciplinaire de l'agroécologie (AgriSud, 2020; Altieri & Nicholls, 2020).

Cette approche systémique et holistique permet concomitamment de préserver les équilibres souvent précaires entre les hommes et les femmes, d'une part, et leur environnement, d'autre part, tout en assurant une pérennité économique et sociale de leurs activités dans le secteur agricole (AgriSud, 2010). Ceci inclut notamment qu'aux différents maillons de la chaîne de valeur du système alimentaire (Dumont et al., 2016; Gallardo-López et al., 2018), depuis la conception des phases de productions agricoles sur terrain (échelle du champ ou de l'agroécosystème), en passant par la distribution des produits jusqu'à leur consommation (échelle territoriale, régionale, nationale ou transnationale), des impacts négatifs ne soient pas générés sur le plan environnemental, social (par l'application de la justice sociale, par exemple dans la distribution des terres), ou économique (par la promotion du commerce équitable).

Parmi les défis auxquels doit répondre l'agroécologie, le défis agricole et environnemental semble à ces jours, avoir plus de résonance et capter davantage l'attention de la majorité de la communauté scientifique (Dumont et al., 2016) tandis que les défis socio-économiques semblent plutôt alimenter le militantisme de certains acteurs politiques et des mouvements sociaux indépendants, exerçant un travail de lobbying vis-à-vis des décideurs politiques.

Notre thèse s'inscrit donc dans le cadre du défi agricole et environnemental que l'agroécologie doit relever, qui se résume selon le rapport (Claveirole, 2016) dans le journal officiel de la république française au : « respect du principe de durabilité, c'est-à-dire que l'agriculture ne doit pas porter atteinte aux milieux naturels dont elle est une partie intégrante, mais bien au contraire, chercher à y valoriser des interactions positives existantes et potentielles, afin d'en tirer profit ». La société doit donc non seulement être attentive à l'action de l'agriculture sur l'environnement

mais, tout autant, faire en sorte de l'encourager à renforcer ces interactions; ce qui signifie :

- ✓ la restauration des fonctionnalités naturelles des agroécosystèmes;
- ✓ la lutte contre l'érosion des sols et la préservation de leur fertilité ;
- ✓ la réduction de la consommation d'énergie, d'eau, d'intrants chimiques, de produits vétérinaires et d'autres intrants externes;
- ✓ l'utilisation des interactions biologiques, des services écosystémiques et des potentiels offerts par les ressources naturelles (biodiversité, photosynthèse, etc.) en maintenant leur capacité de renouvellement du point de vue qualitatif et quantitatif ;
- ✓ la contribution à l'atténuation et à l'adaptation aux effets du dérèglement climatique et à la résilience des agroécosystèmes ;
- ✓ l'amélioration du bien-être animal.

Au vu de ce qui précède, nous pouvons résumer l'agroécologie, d'une manière générale, à l'instar de Altieri & Nicholls (2020), comme étant une approche qui vise le développement de modèles de production agricoles préservant les écosystèmes des dégradations, tout en fournissant une diversité de services écosystémiques, pour créer un système d'approvisionnement alimentaire équitable et durable à travers le monde.

1.2.1. Rapprochement entre les principes de l'agroécologie et les objectifs de développement durable

Les principes de l'agroécologie dans la gestion du système de production alimentaire mondial s'alignent bien avec certains objectifs de développement durable (ODD), qu'ils permettraient donc d'atteindre. En effet, la contribution des principes de l'agroécologie pourrait concerner notamment l'ODD2 (faim zéro), l'ODD3 (Bonne santé et bien-être), l'ODD5 (Égalité des sexes), l'ODD6 (Eau propre et assainissement), l'ODD7 (Energie propre et abordable), l'ODD8 (Travail décent et croissance économique), l'ODD10 (Réduction des inégalités), l'ODD13 (Action climatique) (Rahmann et al., 2017; Altieri & Nicholls, 2020; Schwarz et al., 2022).

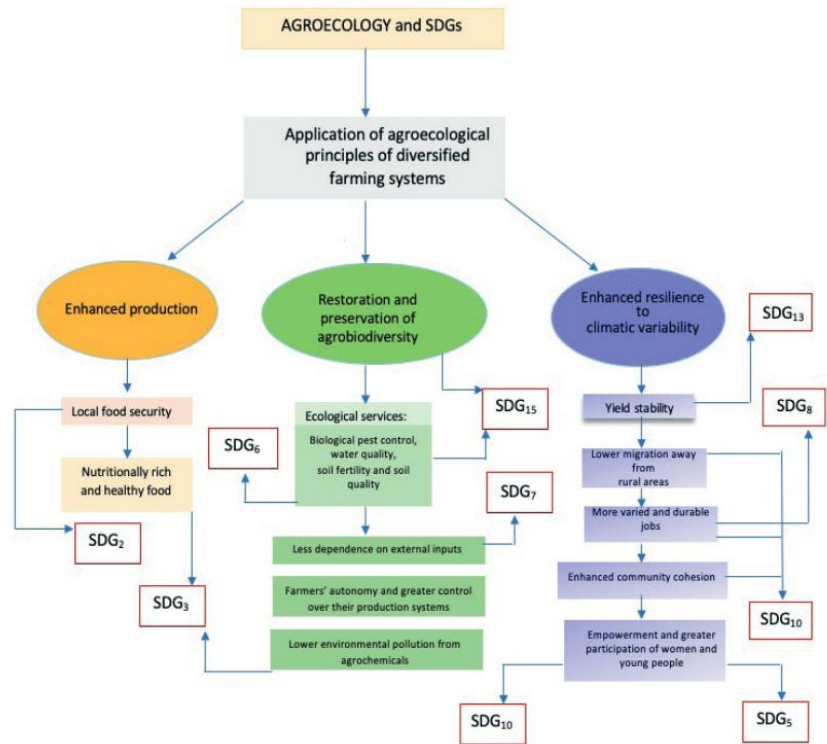


Figure 1-4 : Contribution des principes agroécologiques dans les ODD selon Altieri & Nicholls, (2020).

De ce qui précède, l’humanité a bel et bien besoin de systèmes alimentaires qui soutiennent la conservation de la nature plutôt que d’entrer en conflit avec elle (Gordon et al., 2017). De plus en plus, l’agroécologie est proposée comme une option permettant de concilier la production alimentaire et la conservation de la nature. Elle mobilise donc les connaissances et les concepts de l’écologie pour concevoir et gérer durablement les agroécosystèmes (Gliessman, 2014). Les écosystèmes naturels complexes présentent quatre propriétés que les agroécosystèmes devraient viser, à savoir la productivité, l’efficacité, la résilience et l’autosuffisance (Chapin et al., 1996; Tilman et al., 2001).

La reconception des systèmes agricoles, tant du point de vue de leur structure (composantes) que de leur dynamique (interactions), doit s’appuyer sur six principes (Bonaudo et al., 2014) :

- (i) la diversité, c’est-à-dire l’hétérogénéité des modes d’occupation des sols ainsi que des composantes biotiques et abiotiques;

- (ii) la maximisation des interactions écologiques, par exemple prédateur-proie, ou des interactions fondées sur la production, telles que les complémentarités entre cycles de production ;
- (iii) la prise en compte simultanée des fonctions de production, immunitaires et métaboliques des agroécosystèmes afin de préserver leur intégrité fonctionnelle ;
- (iv) la fermeture des cycles de l'énergie et des matières, c'est-à-dire la réduction des pertes et des intrants externes, ainsi que la substitution des intrants chimiques par des intrants naturels;
- (v) l'optimisation du calendrier de disponibilité des nutriments pour les cultures et les animaux;
- (vi) le développement d'une gestion collective à l'échelle du paysage, incluant des éléments semi-naturels.

Parmi les stratégies mobilisées pour mettre en œuvre ces principes agroécologiques, les systèmes intégrés agriculture-élevage occupent une place particulière. En favorisant les interactions entre productions végétales et animales, ils améliorent le recyclage des ressources, renforcent les synergies biologiques au sein des agroécosystèmes et réduisent la dépendance aux intrants externes.

Dans cette perspective, les principes agroécologiques plaident en faveur d'une connexion ou reconnexion entre les cultures et les animaux domestiques lorsque cela est possible (Van Kernebeek et al., 2016 ; Lemaire et al., 2018), en opposition à la déconnexion progressive induite par la spécialisation et l'agrandissement des exploitations, caractéristiques de l'agriculture industrielle.

Face aux défis agricoles et environnementaux actuels, l'intégration animaux-plantes qu'elles soient fourragères ou vivrières, au sein d'un même agroécosystème, apparaît ainsi comme une voie prometteuse d'intensification agroécologique (Vall et al., 2012; Bénagabou et al., 2017). Toutefois, sa réussite repose sur une gestion adaptée des interactions entre les composantes du système, notamment du pâturage, dont les effets peuvent être à la fois bénéfiques ou défavorables pour les propriétés du sol et la dynamique des communautés végétales (Harrison et Bardgett, 2008).

1.2.2. Intégration agriculture et élevage: une pratique d'intensification agroécologique entre les compartiments animal et végétal dans un agroécosystème

1.2.2.1. Cadre conceptuel du modèle intégré agriculture-élevage dans une exploitation agricole

L'intégration agriculture-élevage (IAE) constitue un des fondements conceptuels des systèmes de production durable dans un agroécosystème (Vall et al., 2012; Bénagabou et al., 2017). Elle peut être comprise comme étant un modèle d'organisation des productions agricoles combinant, dans un même espace ou dans des espaces interconnectés, les productions végétales et animales dans une logique fonctionnelle de complémentarité, pour mieux recycler les nutriments et mieux valoriser l'énergie animale, à l'échelle d'une exploitation ou d'un territoire (Ryschawy et al., 2014).

Ce système repose donc sur le principe que la durabilité fonctionnelle d'un agroécosystème et sa résilience sont fondées sur l'efficacité des synergies entre les compartiments animal et végétal. Ces synergies contribuent donc à renforcer l'intensification écologique entre ces deux compartiments, permettant ainsi d'accroître la productivité, la durabilité voire même la résilience des exploitations agricoles (Blanchard et al., 2012; Vall et al., 2012; Bénagabou et al., 2017).

L'intégration agriculture-élevage (IAE) repose sur trois piliers biotechniques qui permettent non seulement le recyclage de la biomasse et des nutriments entre les composantes animale et végétale, mais aussi l'utilisation efficiente de l'énergie animale pour faciliter le travail dans l'exploitation agricole. Ces piliers biotechniques sont entre autres :

- l'alimentation du bétail (par les productions des fourrages et des résidus de cultures) que la composante végétale apporte dans cette interaction ;
- la fertilité des sols (par la production de fumure organique issue des déjections animales) que la composante animale apporte dans cette interaction ;
- la traction (par l'utilisation de l'énergie animale pour le labour des champs ou le transport des produits), que les animaux facilitent pour alléger la pénibilité du travail des paysans.

L'intégration animaux-plantes (fourrages ou vivrières) dans un même agroécosystème, comme par exemple l'implantation de haies fourragères dans les champs vivriers (Rivero et al., 2021), les arbres ou arbustes fourragers (Zampaligré et al., 2013; Ouédraogo et al., 2021), la valorisation des résidus de cultures comme fourrages pâturés directement aux champs (Vall et al., 2012), constituent des pistes

de solutions évidentes pour des productions animales et végétales complémentaires et durables, réduisant le recours aux intrants extérieurs et la pollution de l'environnement par les déchets. Elle permet de ce fait, d'assurer la stabilité des agroécosystèmes par le recyclage des nutriments à travers les cycles biogéochimiques (Bonaudo et al., 2014; Rahmann et al., 2017; Altieri & Nicholls, 2020; Ryschawy et al., 2012; Wolde & Tamir, 2016).

1.2.2.2. Formes et échelles de l'intégration agriculture et élevage

L'intégration agriculture-élevage (IAE) peut être implémentée sous différentes formes selon l'échelle d'organisation. Celle-ci peut se limiter à une parcelle, s'étendre à une exploitation, voire à tout un territoire (Ryschawy et al., 2012). À l'échelle de la parcelle, elle se traduit notamment par l'association de cultures fourragères ou de légumineuses avec des céréales, et par la pratique du pâturage post-récolte.

À l'échelle de l'exploitation, elle prend la forme d'un système mixte où les cultures et les animaux coexistent et interagissent via des échanges de flux de biomasse, d'aliments ou de fertilisants organiques. À l'échelle territoriale par contre, l'intégration peut impliquer des échanges inter-exploitations (Battheu-Noirfalise et al., 2024). Il s'agit par exemple, que les exploitations agricoles spécialisées en culture fournissent des résidus aux éleveurs comme aliments pour leur bétail. Ces éleveurs apportent en retour aux agriculteurs, du fumier ou du compost qui, permettent de restaurer la fertilité de leurs sols en apportant les nutriments nécessaires aux plantes.

Dans ces différents modèles d'intégration, les animaux jouent un rôle central dans le transfert et le recyclage des nutriments. Bien que plusieurs espèces puissent assurer cette fonction, les caprins présentent des atouts particulièrement intéressants dans les contextes tropicaux. Leur capacité à valoriser une grande diversité de ressources fourragères, y compris ligneuses et spontanées, ainsi qu'à se déplacer sur de vastes espaces, leur confère un rôle particulièrement important, dans la redistribution des nutriments entre les différentes composantes de l'agroécosystème et dans le maintien de la fertilité des sols.

1.2.3. Recyclage des nutriments, clé de l'intensification écologique des interactions entre composantes animales et végétales de l'agroécosystème

L'agriculture et l'élevage en ASS sont basés sur un modèle de production extensive, qui recourt de façon très limitée aux intrants extérieurs. Comme une partie des nutriments est exportée par ces productions animales et végétales, les sols

se retrouvent appauvris après une certaine durée d'exploitation. L'interconnexion de ces deux compartiments de l'agroécosystème (animal et végétal) aussi bien à l'échelle de la parcelle exploitée que du territoire, est avantageuse car elle permet la valorisation des sous-produits issus de chaque composante et la réduction de la compétition avec les humains (Battheu-Noirfalise et al., 2024).

A cet effet, les résidus de cultures apportés à l'animal ou pâturés directement aux champs après récoltes ou en période de jachère, assurent une alimentation du bétail à moindre coût. En revanche, les déjections animales directement déposées dans les champs en jachère ou encore collectées dans les différents abris de nuit et appliquées dans les parcelles de cultures permettent de fertiliser les sols en y apportant des nutriments nécessaires pour les plantes vivrières ou fourragères sans recourir aux fertilisants chimiques (Vall et al., 2012; Musafiri et al., 2022; Bénagabou et al., 2017).

Dans un système de production intégrant les composantes animales et végétales d'un agroécosystème, les herbivores domestiques, surtout ceux élevés en pâturage libre, contribuent énormément comme agents intermédiaires de grande importance, à la mobilisation, au transfert et à la redistribution des nutriments au sein de l'agroécosystème. A travers leur consommation fourragère et leurs déjections, les herbivores influencent fortement le flux des nutriments d'un agroécosystème (Augustine et al., 2003; Schlecht et al., 2004; Grillot, Guerrin, et al., 2018; Huruba et al., 2018; Audouin et al., 2024).

Ces interactions animaux-plantes constituent le socle du processus d'intensification écologique entre ces deux composantes. Leur importance dans un agroécosystème dépendra cependant de l'efficacité des stratégies et des pratiques de cette intégration, susceptibles de générer des interactions positives pertinentes entre les animaux d'élevage et les plantes cultivées aussi bien à l'échelle d'une exploitation que d'un territoire (Rufino et al., 2006; Battheu-Noirfalise et al., 2024).

1.3. L'élevage des caprins et son potentiel dans un processus d'intensification agroécologique

La chèvre (*Capra hircus*) compte parmi les petits ruminants les plus couramment élevés en ASS en général, et dans la partie ouest de la RDC en particulier. Son élevage est assez simple à gérer. Il est pratiqué aussi bien par des hommes, des femmes que des enfants, même si souvent les hommes y sont beaucoup plus impliqués. Du fait de sa facilité de gestion et de sa popularité dans les exploitations familiales, l'élevage des caprins contribue grandement à l'économie et à la sécurité alimentaire des populations rurales. En RDC par exemple, les chèvres représentent

environ 60 % du cheptel domestique national, ce qui témoigne de leur importance économique et sociale dans les exploitations familiales.

Tableau 0-1. Les effectifs des principales espèces d'élevage en RDC

Espèces	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Bovins	794 773	842 453	893 006	946 585	1 003 378	1 005 385
Ovins	904 080	904 984	905 889	906 794	907 700	909 515
Caprins	4 052 161	4 085 287	4 064 322	4 070 416	4 074 482	4 082 631
Porcins	977 379	981 158	984 952	988 461	992 584	994 569
Volailles	20 067 452	20 127 655	20 188 039	20 248 604	20 308 997	20 349 615

Source: Ministry of Agriculture, National Agricultural Statistics, Department (SNSA), Kinshasa, 2016.

1.3.1. Historique et diffusion des caprins en Afrique subsaharienne

La domestication de la chèvre remonte à environ 10 000 ans dans les régions du Proche et du Moyen-Orient. Les chèvres ont ensuite été introduites progressivement en Afrique par les routes commerciales et les migrations humaines. Leur diffusion rapide en Afrique subsaharienne s'explique par leur remarquable plasticité écologique et leur capacité à survivre dans des environnements difficiles (Colli et al., 2018; Baenyi Simon et al., 2021).

En Afrique centrale par exemple, les chèvres sont présentes depuis plusieurs siècles et constituent aujourd'hui l'une des principales espèces animales des systèmes paysans. Les races locales, notamment la chèvre naine, présentent une forte résistance aux maladies tropicales, aux parasites et aux conditions climatiques variables. Elles ont de ce fait, acquis une importance particulière dans les zones tropicales humides d'Afrique centrale où les bovins sont limités par la trypanosomose transmise par les glossines. Cette tolérance relative explique la forte expansion des petits ruminants dans les régions forestières et subhumides (Colli et al., 2018).

1.3.2. Importance et choix de l'élevage des caprins chez les populations rurales en ASS

Dans de nombreux pays d'Afrique subsaharienne en général et en RDC en particulier, les caprins constituent le principal cheptel mammifère des ménages ruraux pauvres (Baenyi Simon et al., 2021). Leur importance dépasse largement la seule production de viande ou de lait car, l'élevage des chèvres intervient dans la sécurité alimentaire, la gestion des risques économiques, la valorisation des biomasses non consommables par l'homme, le recyclage des nutriments au sein des agroécosystèmes et la restauration de la fertilité des sols.

Cet élevage est souvent pratiqué en système extensif, caractérisé par le pâturage libre. Ce système favorise ainsi les transferts horizontaux des matières organiques et des éléments nutritifs depuis les parcours naturels vers les champs cultivés. De ce fait, ce système d'élevage permet à la chèvre de connecter les compartiments de l'agroécosystème et de faire circuler ces flux des matières et des nutriments via la consommation fourragère et la dispersion des déjections.

Dans un contexte d'accès limité aux intrants minéraux, caractérisant la majorité des exploitations familiales d'Afrique centrale en général et de la RDC en particulier, les déjections animales représentent une source essentielle d'azote (N), de phosphore (P), de potassium (K) et de matière organique. Les chèvres, à l'instar d'autres espèces animales, jouent ainsi un rôle écologique majeur dans le recyclage et la redistribution des nutriments via leurs déjections (Bloor et al., 2012, Huruba et al., 2018; Audouin et al., 2024). Cette fonction devient particulièrement importante dans les régions où les sols sont fortement dégradés, pauvres en matière organique et soumis à une pression démographique croissante.

Malgré un potentiel agricole immense, les systèmes de production paysanne en RDC sont confrontés à un accès limité aux engrais minéraux, à l'épuisement des sols, à la fragmentation foncière et à une faible mécanisation, caractéristique d'une agriculture extensive. Dans ce contexte, l'élevage caprin étant très populaire, représenterait un levier stratégique d'adaptation de l'agriculture paysanne aux contraintes liées à l'accès aux engrais minéraux.

Cette popularité de l'élevage caprin est due aux multiples avantages qu'il revêt. La petite taille de la chèvre lui confère une certaine agilité, lui permettant non seulement de s'adapter à tout type d'élevage traditionnel, qu'il s'agisse de l'élever attachée à la corde au piquet, enfermée dans un enclos, ou encore en pâturage libre sur des herbages naturels (Ndona et al, 2024).

Ce dernier mode d'élevage permet à la chèvre d'explorer et d'accéder à une diversité de parcours et d'unités de végétation, afin d'exploiter des ressources fourragères aussi diversifiées que possible, même les plus pauvres et les plus marginales, sans beaucoup de contraintes, contrairement à d'autres espèces animales comme les bovins.

Les caprins sont donc des herbivores très particuliers et intéressants pour les éleveurs à revenus modestes, car leur coût d'exploitation, notamment celui de l'alimentation, est presque nul étant donné que les chèvres peuvent se nourrir de ressources fourragères marginales et passer la nuit dans un enclos construit avec les matériaux peu coûteux comme le bois.

Ils ont en effet, une grande capacité à transformer une grande diversité de ressources alimentaires pauvres, en produits animaux de valeur tels que la viande et le lait, voire même les sous-produits comme les déjections animales, valorisables comme fertilisant ou comme matière première de production de biogaz.

Tableau 0-2. Avantage comparatif de l'élevage des chèvres

Critères	Caprins	Bovins	Porcins	Volailles
Coût d'acquisition	Faible	Élevé	Modéré	Faible
Résistance aux maladies tropicales	Élevée	Faible	Modérée	Faible
Besoin en alimentation concentrée	Faible	Faible	Élevé	Élevé
Mobilité dans l'agroécosystème	Élevée	Modérée	Faible	Faible
Adaptation aux petites exploitations familiales	Très élevée	Faible	Modérée	Élevée
Production de fumier	Élevée	Très élevée	Élevée	Modérée
Besoin en temps de travail	Faible	Élevé	Très élevé	Modéré

Les chèvres pourraient donc occuper une place très importante dans le processus d'intensification écologique d'un système de production intégrée «plante-animal», notamment par la mobilisation et le transfert des nutriments entre les différents compartiments d'un agroécosystème, à travers la consommation fourragère et la dispersion des urines et fèces, riches en nutriments et en matières organiques fibreuses.

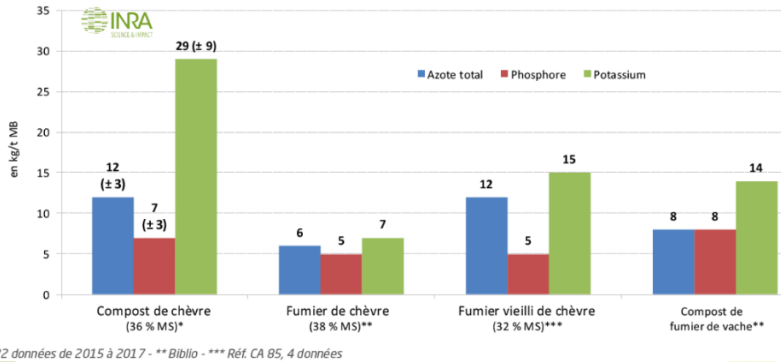


Figure 0-5. Valeurs en azote, phosphore et potassium du fumier et du compost de chèvres et de vaches

La consistance fibreuse et la richesse en matières organiques des déjections des chèvres permettent un meilleur stockage du carbone dans le sol, une décomposition lente de la matière organique et une libération progressive des nutriments, évitant ainsi un lessivage rapide. Ces déjections jouent de ce fait, un grand rôle dans les cycles biogéochimiques et l'entretien de la biodiversité au sein des agroécosystèmes.

A cet effet, elles constituent une ressource indispensable pour une catégorie de microfaune du sol, notamment les invertébrés coprophages dont la vie dépend de la qualité et la quantité des fèces apportés par les animaux. Elles participent ainsi, à l'équilibre de la chaîne trophique et au maintien de la biodiversité au sein d'un agroécosystème, en y renforçant davantage le processus d'intensification écologique grâce au recyclage des éléments nutritifs majeurs tels que le NPK qu'elles contiennent (Bloor et al., 2012).

1.3.3. Les caprins dans le cycle de l'azote des agroécosystèmes

Les chèvres jouent un grand rôle dans le recyclage de l'azote. Elles valorisent une quantité importante de biomasses souvent inutilisées par l'homme, comme par exemple les feuilles d'arbres et d'arbustes, les adventices, les résidus de cultures, et autres ordures ménagères qu'elles consomment. La partie non digérée de ces différentes biomasses consommées, est ensuite rejetée via les fèces et les urines qui, à leur tour produisent un fumier riche en azote organique, en phosphore, en potassium et en carbone organique.

Les urines des caprins apportent principalement de l'azote sous forme de l'urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, rapidement minéralisable sous l'action des microorganismes. En revanche, leurs fèces permettent d'améliorer la matière organique du sol, sa capacité de rétention en eau, l'activité microbienne, et la disponibilité des nutriments.

Plusieurs études ont mis en évidence une valeur fertilisante élevée des déjections de chèvres dans les systèmes agricoles d'Afrique subsaharienne (Washaya et al, 2023).

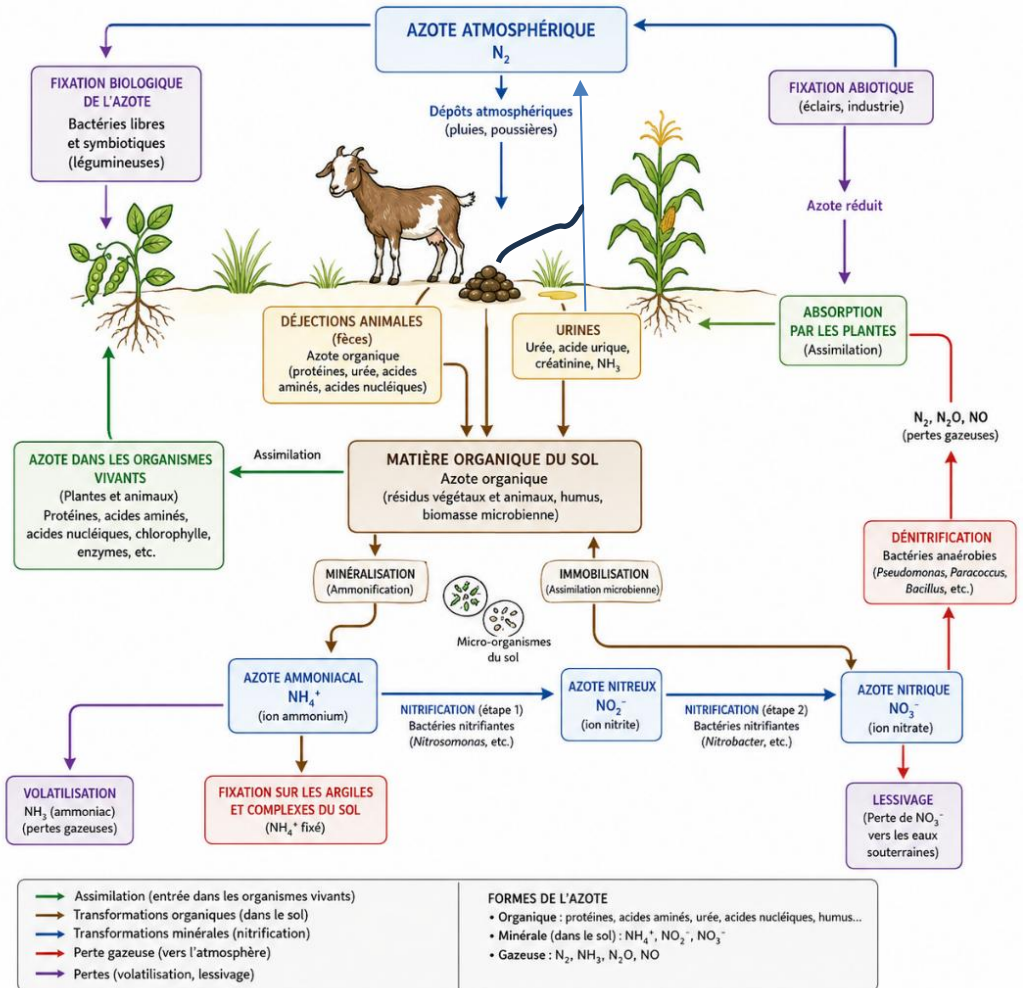
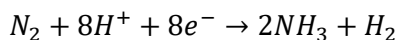


Figure 0-6. La chèvre et le cycle d'azote dans un agroécosystème

1.3.3.1. Le cycle de l'azote

L'azote constitue un élément essentiel à la vie puisqu'il entre dans la composition des protéines, des acides aminés, des enzymes, de la chlorophylle et des acides nucléiques. Bien que l'atmosphère terrestre soit composée d'environ 78 % d'azote sous forme de diazote (N_2), cette forme est chimiquement très stable et ne peut être utilisée directement par la majorité des organismes vivants, notamment les plantes supérieures. Les différents mécanismes de son assimilation et les réactions qui en découlent ont été suffisamment documentés par nombreux auteurs (Mobley & Hausinger, 1989 ; Prosser, 1989 ; Kowalchuk & Stephen, 2001 ; Robertson & Groffman, 2015).

Selon ces auteurs, le début du cycle par l'entrée de l'azote dans les écosystèmes terrestres, repose principalement sur le processus de fixation biologique de l'azote atmosphérique. Cette transformation est assurée par des microorganismes spécialisés capables de réduire le diazote atmosphérique en ammoniac (NH₃) grâce à l'action de l'enzyme nitrogénase. La réaction générale de fixation peut être représentée comme suit :



L'ammoniac produit est rapidement protoné dans le sol pour former l'ion ammonium (NH₄⁺), première forme minérale directement utilisable par les plantes.

La fixation biologique est réalisée soit par des bactéries vivant en symbiose avec les racines des légumineuses, notamment les genres *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* et *Sinorhizobium*, soit par des bactéries libres du sol telles que *Azotobacter*, *Clostridium* et *Beijerinckia*. Ces microorganismes constituent la principale porte d'entrée de l'azote atmosphérique dans les agroécosystèmes.

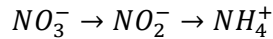
Tableau 0-3. Principales formes de l'azote dans le cycle

Forme d'azote		Localisation
Diazote	N ₂	Atmosphère
Protéines, acides aminés, acides nucléiques	R-NH ₃	Matière organique végétale et animale
Urée	CO(NH ₂) ₂	Urines
Ammonium	NH ₄ ⁺	Sol minéral
Nitrite	NO ₂ ⁻	Sol minéral
Nitrate	NO ₃ ⁻	Sol minéral
Ammoniac	NH ₃	Atmosphère
Dioxyde d'azote	NO ₂	Atmosphère
Monoxyde d'azote	NO	Atmosphère
Protoxyde d'azote	N ₂ O	Atmosphère (puissant GES)
Diazote	N ₂	Atmosphère (78% de l'air)

1.3.3.1.1. Assimilation de l'azote par les plantes

Les plantes absorbent l'azote essentiellement sous deux formes minérales présentes dans la solution du sol : l'ion ammonium (NH_4^+) et l'ion nitrate (NO_3^-). Une fois absorbé, l'azote est incorporé dans les tissus végétaux par une série de réactions biochimiques conduisant à la synthèse de composés organiques essentiels.

Lorsque l'azote est absorbé sous forme nitrique, il doit d'abord être réduit à l'intérieur de la plante. Cette réduction s'effectue en deux étapes successives :



L'ammonium ainsi produit est ensuite incorporé aux acides aminés qui serviront à la synthèse des protéines, de la chlorophylle, des enzymes, de l'ADN et de l'ARN. L'azote minéral du sol est ainsi converti en azote organique végétal.

1.3.3.1.2. Transfert de l'azote des plantes vers les chèvres

Dans les systèmes de pâturage libre, les chèvres prélèvent l'azote contenu dans la végétation en consommant des herbacées, des légumineuses, des feuilles d'arbustes ainsi que des résidus de cultures. Les protéines végétales et autres composés azotés ingérés sont digérés puis assimilés par l'organisme animal.

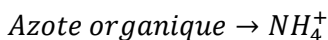
Une partie de cet azote est utilisée pour la production de tissus corporels, notamment les protéines musculaires, les poils, les enzymes et, chez les femelles, le lait. Cependant, seule une fraction limitée de l'azote ingéré est retenue dans les produits animaux. Une proportion importante est rejetée sous forme de fèces et d'urines, assurant ainsi le retour de l'azote vers le sol.

1.3.3.1.3. Décomposition des déjections caprines et minéralisation de l'azote

Les déjections caprines constituent une source majeure d'azote organique dans les agroécosystèmes. Les fèces contiennent principalement des protéines non digérées, des acides aminés, des cellules microbiennes mortes, des résidus végétaux partiellement décomposés ainsi que des composés humiques.

Après leur dépôt au sol, ces matières organiques sont dégradées par une communauté diversifiée de microorganismes. Les bactéries des genres *Bacillus*, *Pseudomonas* et *Proteus*, les champignons tels que *Aspergillus*, *Penicillium* et *Trichoderma*, ainsi que les actinomycètes du genre *Streptomyces*, participent activement à cette décomposition.

Le processus de transformation de l'azote organique en azote minéral est appelé minéralisation ou ammonification. Il peut être résumé par la réaction simplifiée suivante :

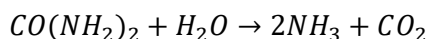


Par exemple, les protéines sont d'abord hydrolysées en acides aminés, puis ces derniers sont désaminés pour libérer l'ion ammonium (NH_4^+), forme minérale directement impliquée dans la nutrition des plantes et dans les transformations ultérieures du cycle de l'azote.

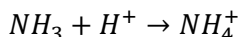
1.3.3.1.4. Transformation de l'urée contenue dans les urines

Les urines caprines représentent une source particulièrement importante d'azote rapidement disponible. L'azote y est principalement présent sous forme d'urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$.

Après son dépôt dans le sol, l'urée est hydrolysée sous l'action de l'enzyme uréase produite par de nombreux microorganismes, notamment *Bacillus*, *Proteus* et *Corynebacterium*. Cette réaction conduit à la formation d'ammoniac et de dioxyde de carbone :



L'ammoniac produit est ensuite rapidement transformé en ammonium selon la réaction :

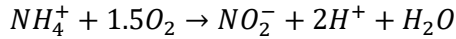


Cette étape constitue l'une des principales voies d'enrichissement du sol en azote minéral après le passage des animaux.

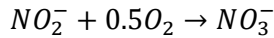
1.3.3.1.5. Nitrification de l'azote ammoniacal

Dans les sols bien aérés, l'ammonium issu de la minéralisation est progressivement oxydé en nitrate au cours du processus de nitrification. Cette transformation se déroule en deux étapes biologiques successives.

La première étape consiste en l'oxydation de l'ammonium en nitrite sous l'action de bactéries nitrifiantes telles que *Nitrosomonas* et *Nitrosospira* :



La seconde étape correspond à l'oxydation du nitrite en nitrate par des bactéries appartenant notamment aux genres *Nitrobacter* et *Nitrospira* :



Le nitrate ainsi formé constitue la principale forme d'azote absorbée par les cultures dans la plupart des sols agricoles.

1.3.3.1.6. Immobilisation microbienne de l'azote

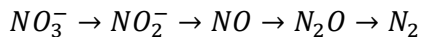
Une partie de l'azote minéral disponible dans le sol peut être temporairement réincorporée dans la biomasse microbienne. Ce processus, appelé immobilisation microbienne, correspond à l'assimilation du NH_4^+ ou du NO_3^- par les microorganismes du sol lors de leur croissance.

Cette immobilisation joue un rôle important dans la régulation de la disponibilité de l'azote puisqu'elle limite temporairement les pertes tout en constituant une réserve qui pourra être ultérieurement remobilisée lors de la décomposition des microorganismes.

1.3.3.1.7. Dénitrification et retour de l'azote à l'atmosphère

Lorsque les sols deviennent pauvres en oxygène, notamment dans les conditions d'engorgement ou de saturation en eau, certaines bactéries utilisent le nitrate comme accepteur final d'électrons au cours de leur respiration.

Cette réduction progressive du nitrate conduit à la formation de plusieurs composés gazeux :

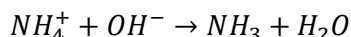


Les principaux microorganismes impliqués dans ce processus sont des bactéries appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Paracoccus* et *Bacillus*. La dénitrification se termine par la libération de diazote (N_2) dans l'atmosphère, bouclant ainsi le cycle biogéochimique de l'azote.

1.3.3.1.8. Volatilisation de l'ammoniac

Dans les régions tropicales caractérisées par des températures élevées et un pH relativement alcalin, une partie de l'ammonium issu des urines peut être convertie en ammoniac gazeux et s'échapper vers l'atmosphère.

Cette perte est décrite par la réaction suivante :



La volatilisation constitue l'une des principales voies de perte d'azote dans les systèmes d'élevage extensifs.

1.3.3.2. Rôle des chèvres dans le recyclage de l'azote et le transfert de fertilité

Dans les agroécosystèmes d'Afrique subsaharienne, les chèvres jouent un rôle fondamental dans le recyclage et la redistribution des nutriments. En pâturant sur de vastes surfaces, elles prélèvent l'azote contenu dans la végétation naturelle puis le concentrent dans les zones de repos, de parcage ou à proximité des habitations sous forme de fèces et d'urines.

Ce transfert biologique favorise l'enrichissement localisé des sols en azote minéral et organique, améliore la disponibilité des nutriments pour les cultures et contribue au maintien de la fertilité des exploitations agricoles. Les chèvres assurent ainsi une connexion fonctionnelle entre les parcours naturels, les microorganismes du sol et les systèmes de culture.

Dans les systèmes de pâturage libre caractéristiques de nombreuses régions d'Afrique subsaharienne, elles apparaissent comme de véritables vecteurs biologiques de transfert de fertilité, jouant un rôle déterminant dans la dynamique de l'azote et plus largement dans le fonctionnement des agroécosystèmes intégrés agriculture-élevage.

Pourtant, malgré l'importance socio-économique largement reconnue des caprins en Afrique subsaharienne, leur contribution aux flux de nutriments et aux processus d'intensification agroécologique demeure encore peu documentée. Les connaissances disponibles portent principalement sur leurs performances zootechniques et leur rôle dans les moyens d'existence des ménages ruraux, tandis que leur fonction écologique en tant qu'agents de recyclage et de redistribution de la fertilité entre les différents compartiments de l'agroécosystème reste insuffisamment étudiée.

Au regard de ces constats, la recherche sur les petits ruminants en général, et sur les chèvres en particulier, ne devrait pas se limiter à leur importance économique et sociale déjà bien établie, mais également explorer leur contribution au recyclage des nutriments, notamment de l'azote (Vayssières et al., 2022), ainsi qu'aux mécanismes de régulation écologique souvent peu perceptibles.

Une meilleure compréhension de ces fonctions permettrait de renforcer la reconnaissance et la valorisation de la multifonctionnalité des élevages caprins dans les exploitations agricoles d'Afrique subsaharienne, tout en contribuant à la conception de systèmes agroécologiques plus durables et adaptés aux contextes locaux. Cette lacune de connaissances justifie la présente recherche et conduit à formuler les questions, hypothèses, objectifs et stratégies de recherche présentés ci-après.

Chapitre 2

**Questions, hypothèses, objectifs et
stratégies de recherche**

2.1. Questions de recherche

Malgré les potentiels de l'élevage des caprins, peu d'informations voire aucune, ne sont disponibles, pour élucider son rôle ou son importance dans le fonctionnement des agroécosystèmes en général, et plus particulièrement dans le flux des nutriments, dont l'azote au sein des compartiments exploités. Comblant ce manque d'information permettrait de proposer des voies d'exploitation des chèvres, comme l'un des leviers d'intensification agroécologique en Afrique subsaharienne en général, et particulièrement dans les conditions de petites exploitations familiales en RDC, où la chèvre est le petit ruminant le plus élevé.

La question centrale de cette thèse est donc de savoir dans quelle mesure, les chèvres pourraient être utilisées comme "composante animale" bénéfique pour un système IAE ?

Pour répondre à cette question principale, il s'est avéré nécessaire d'acquérir certaines connaissances intermédiaires, notamment celles relatives:

- aux variantes d'élevage traditionnel des caprins et leurs caractéristiques;
- à l'identification de différentes composantes de l'agroécosystème présentes;
- aux interactions de ces composantes avec les chèvres à l'échelle de l'exploitation et du village (territoire);
- à la nature et à l'intensité des flux de nutriments entre les composantes, assurés par les chèvres;
- à la variabilité saisonnière de ces flux.

2.2. Hypothèses et objectifs de recherche

Au regard de ce qui précède, la présente étude repose sur deux hypothèses principales. D'une part, l'élevage traditionnel des chèvres constitue effectivement une composante intermédiaire qui permettrait de mobiliser et de transférer les nutriments tels que l'azote, d'un compartiment à l'autre de l'agroécosystème. D'autre part, à l'échelle d'un village ou d'un territoire, cette mobilisation et ce transfert des nutriments ne pourraient être profitables aux paysans que si de bonnes stratégies et pratiques d'intégration de leurs productions animales et végétales sont correctement appliquées.

De manière générale, la vérification de ces hypothèses contribuera à une meilleure compréhension des services écologiques rendus par les systèmes traditionnels d'élevage caprin.

De manière spécifique, elle permettra de:

1. identifier et caractériser les différents types d'élevages traditionnels des chèvres;
2. identifier et cartographier les composantes de l'agroécosystème et leurs interactions directes ou indirectes avec l'élevage traditionnel des chèvres en pâturage libre, à l'échelle du village ;
3. dégager à partir de ces composantes, un modèle conceptuel des flux d'azote qui traversent la composante animale «élevage des chèvres» vers les autres compartiments de l'agroécosystème ;
4. évaluer le rôle et l'importance des chèvres en pâturage libre dans la mobilisation et le transfert de l'azote dans les différents compartiments de l'agroécosystème qu'elles exploitent à l'échelle du village.

2.3. Stratégie et schéma méthodologique de la recherche

Pour atteindre les objectifs énumérés ci-dessus, nous avons opté pour une stratégie mixte illustrée par la figure 2-1, combinant à la fois le contact direct et l'immersion dans le milieu des éleveurs de chèvres, afin de réaliser les enquêtes de base sur les différents types d'élevage traditionnel, ainsi que l'immersion au sein des troupeaux pour collecter les échantillons de fourrages réellement consommés et de déjections. Cette stratégie comprend également les analyses en laboratoire des échantillons de ces fourrages et déjections, afin d'en déterminer la composition chimique.

Enfin, nous avons mobilisé la télédétection et les SIG pour cartographier l'agroécosystème exploité par les chèvres à l'échelle du village à l'aide d'un drone et géolocaliser leurs déplacements durant le pâturage.

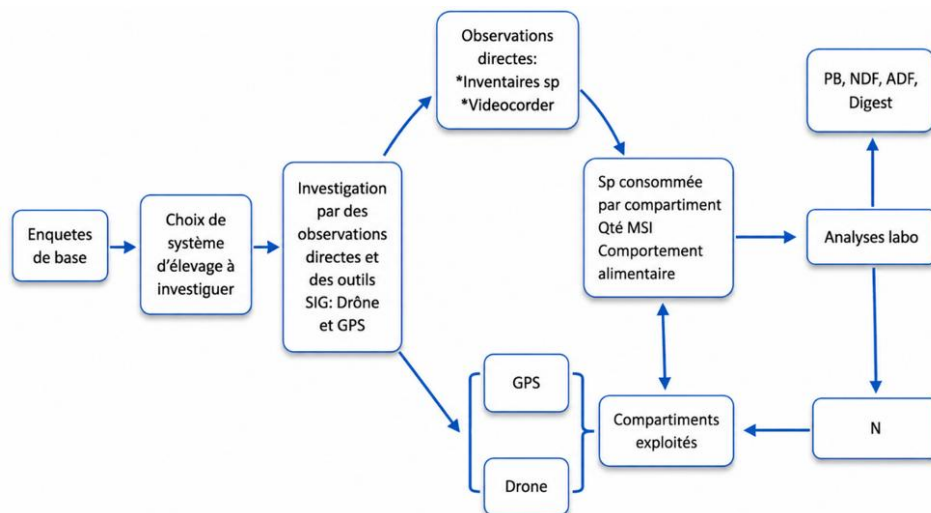


Figure 2-1 : Stratégie et schéma méthodologique de la recherche

A l'issue de la mise en œuvre de cette stratégie de recherche, nous avons structuré et axé les résultats essentiels qui ont permis de tester les hypothèses et répondre à la question de recherche autour de trois études complémentaires détaillées ci-après:

1. Typologie des élevages des caprins dans la partie ouest de la RDC

La première étude porte sur la typologie des élevages caprins et répond au premier objectif de la thèse, qui consistait à identifier et caractériser les différents types d'élevages traditionnels de chèvres. Les résultats ont été publiés dans la revue Farming Systems :

Ndonga, A., Kambashi, B., Beckers, Y., Moulin, C. H., & Bindelle, J. (2024). Contribution of traditional goat farming systems to the sustainable intensification of smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: The example of the western part of the Democratic Republic of Congo. *Farming System*, 2(2). <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100079>

2. Cartographie, suivi et évaluation des consommations fourragères des chèvres dans les agroécosystèmes exploités

La deuxième étude concerne l'identification, la cartographie et l'évaluation des compartiments de l'agroécosystème exploités par les chèvres en pâturage libre, en lien avec le deuxième objectif, qui visait à identifier et cartographier les

composantes de l'agroécosystème avec lesquelles ces élevages interagissent directement ou indirectement pour les échanges de flux d'azote à l'échelle de l'exploitation, du village et du territoire. Les résultats ont été publiés dans *Veterinary and Animal Science* :

Ndona, A., Kikufi, A., Lutete, E., Kambashi, B., Moulin, C.-H., Beckers, Y., & Bindelle, J. (2025). Identification and evaluation of agroecosystem compartments as forage sources for free-ranging goats in smallholder farming systems of western Democratic Republic of Congo. *Veterinary and Animal Science*, 30, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2025.100524>

3. Flux d'azote dans les compartiments de l'agroécosystème exploités par les chèvres en pâturage libre

La troisième étude analyse les flux d'azote entre les différents compartiments de l'agroécosystème exploités par les chèvres en pâturage libre. Elle répond aux troisième et quatrième objectifs de la thèse, à savoir l'élaboration d'un modèle conceptuel des flux d'azote transitant par la composante animale vers les autres compartiments de l'agroécosystème, ainsi que l'évaluation du rôle et de l'importance des chèvres dans la mobilisation et le transfert de l'azote à l'échelle du village. Ces résultats font l'objet d'un manuscrit qui sera soumis pour publication dans « *Nutrient Cycling in Agroecosystems* » ou « *Environment, Development and Sustainability* » :

Ndona, A., Essomandan Kokah, U., Kambashi, B., Moulin, C.-H., Beckers, Y., & Bindelle, J. (à soumettre). Nitrogen recycling and fluxes across agroecosystem compartments under extensive free-ranging systems in Sub-Saharan Africa: case study in smallholder goat farming condition at western part of Democratic Republic of Congo

Chapitre 3

Typologie des élevages des caprins

Ce chapitre est l'intégralité de l'article :

Ndona, A., Kambashi, B., Beckers, Y., Moulin, C. H., & Bindelle, J. (2024). Contribution of traditional goat farming systems to the sustainable intensification of smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: The example of the western part of the Democratic Republic of Congo. *Farming System*, 2(2). <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100079>

Abstract

Integrated crop-livestock systems (ICLS) increase smallholder yields and environmental benefits by enabling positive interactions between livestock and crops. As goat farming is popular in Africa, this study aimed to characterise goat-rearing systems and further understand the role of goat management and the relevant drivers in ecological intensification processes. We conducted an exploratory snowball sampling of 147 goat farmers in the western provinces of the Democratic Republic of Congo (DRC). The smallholders utilised five agroecosystem components: animal husbandry (100%), croplands (100%), rangelands (73%), fishponds (22%) and, beekeeping (2%). In 97% of the cases, the agroecosystem of a single farmer was fragmented, with an average of 3 ± 1 plots of land. In 31% of the cases, the plots of land were 2.5 km apart from the others, 40% were 2.5–5 km apart, and 29% were over 5 km apart. The short distance (<2.5 km) between animal husbandry land and cropland was positively associated ($p < 0.05$) with the use of manure as fertiliser and crop residues as animal feed, contributing to the ecological intensification. Additional factors (training, raising pigs and goats, and vegetable gardening) were significantly associated ($p < 0.05$) with the aforementioned agroecological practices. Consequently, three categories of goat farmers were distinguished. The first group, not committed to the ecological intensification process, had free-grazing goats. The second group also had free-grazing goats, whereas the third tethered or kept goats in confined areas, and both were committed to ecological intensification. Traditional goat farming contributes to ecological intensification when smallholder farmers follow best management practices.

Keywords: Integrated crop-livestock system, ecological intensification, goat farming, ecosystem services, nutrient flow

3.1. Introduction

The world population is constantly increasing, driving food demand (Bourban, 2019) and exerting enormous pressure on natural resources (Syampungani et al., 2021). In this context, tropical humid savannahs are pivotal for agricultural intensification but are also highly vulnerable (Boval et al., 2017; Kuyah et al., 2021) because they usually develop in nutrient-deficient and acidic soils (Faber-Langendoen, 2020). In many countries in sub-Saharan Africa (SSA), crop farming is traditionally practiced using the slash-and-burn method, in which land is opened by fire, cropped for three to four years, and then left for a long fallow period lasting several decades until fertility is restored (Van Vliet et al., 2012; Thomaz, 2017; Tang et al., 2020). This method of managing soil fertility no longer operates efficiently because fallow periods, due to the pressure on land, are getting shorter. Therefore, if smallholder farmers cannot afford to buy imported fertilisers, they will face decreasing yields, subjecting them to the risk of poverty and making them more vulnerable to hazards, including climate change. Thus, affordable technical solutions are required, to intensify smallholder agriculture in sub-Saharan Africa while minimising negative environmental impacts.

Several studies suggest agroecological solutions developed, to limit the loss of soil fertility and soil health by enhancing ecological services (Bonaudo et al., 2014; Grillot et al., 2018; Stark et al., 2018). Ecological services refer to the various natural functions provided by ecosystems, such as cycling nutrients and sequestering carbon in the biomass of a given agroecosystem (Ghaley et al., 2014; Gonzalez-De-Molina et al., 2017). In addition, Ogisi and Begho (2023) reported that, in response to climate change, agroecological solutions enhance the resilience and adaptability of agroecosystems. In this regard, to achieve sustainable agriculture, various agroecological solutions such as integrated crop-livestock systems (ICLS) are recommended (Kuyah et al., 2021; Ogisi and Begho, 2023).

The goat, a significant livestock species in rural regions of SSA (FAOSTAT, 2020; Gracinda Mataveia et al., 2021), has the potential to play a crucial role in ICLS. Better integration of crop production and goat rearing could lead to more sustainable farming for low-income smallholder farmers. Firstly, raising small ruminants is less demanding in terms of inputs (Dossa et al., 2015; Ashit et al., 2020). Goat farming is feasible for a wide range of temperatures and drought conditions (Sejian et al., 2021) and offers many economic and social benefits (FAO, 2015), while concurrently it enhances smallholder resilience (FAO, 2021) with little effort required (Shivakumara et al., 2020; Kumar et al., 2021; Sejian et al., 2021).

Secondly, goats have a highly capable digestive system that can convert poor-quality forage, like savannah grass and crop residues, into valuable food products and manure for soil health improvement (Lamming, 2001). Goat rearing could be a

valuable component of biodiversity, that strengthens the ecological intensification process, which is defined as a set of nature-based solutions to limit high imported inputs and negative environmental impacts in agriculture, by enhancing ecosystem services such as nutrient and organic matter cycling (Gonzalez-De-Molina et al., 2017; Struik et Kuyper, 2017; Kleijn et al., 2019).

However, such an ecological intensification process involving goat farming has not yet been reported (Syampungani et al., 2021). Thus, this gap needs to be addressed (Boval et al., 2017; Sejian et al., 2021). Before that, the misunderstanding of indigenous practices and the knowledge of traditional goat farmers, which support the ecological intensification process, should be explained (Altieri et al., 2012).

Therefore, we conducted the present study in rural areas in the western part of the Democratic Republic of Congo (DRC). It aimed to (1) identify the existing components of the agroecosystem in which goats are reared; (2) describe its spatial structure at the farm or village level; (3) characterise traditional goat farmers, their farming practices, and the associated factors, likely to promote the ecological intensification process; and (4) develop a conceptual model based on these farming practices.

3.2. Materials and methods

3.2.1. Study area

This study was conducted in four provinces in the western DRC—Kinshasa, Congo Central, Kwilu, and Kwango—to assess diverse goat farmer practices, forages, agroecosystem components, and interactions. The study area covered Kinshasa, Congo Central (4-5° S and 15-17° E) (Biloso, 2008) and Kwango, Kwilu (4-8° S and 16-20° E) (Omasombo-Tshonda et al., 2012).

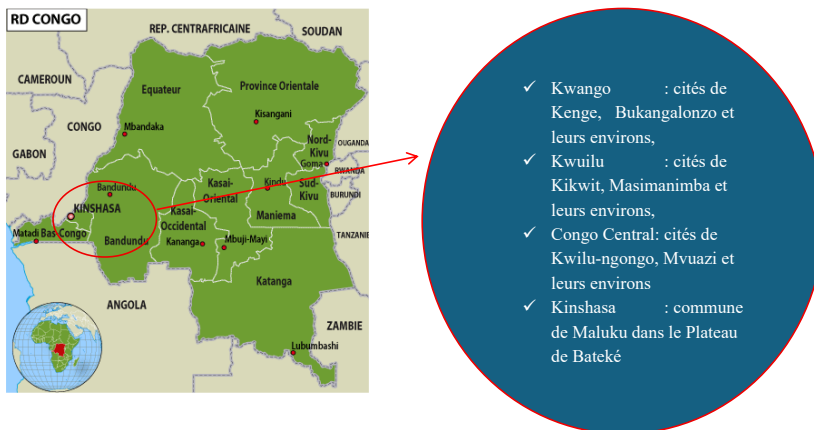


Figure 3-1. *Study area*

The dominant ecosystem in the study area is savannah, interspersed with gallery forests along rivers and wetlands and forest patches at the periphery of Kinshasa Province (Biloso, 2008) in the eastern part of Kongo-Central (Lugangu et al., 2018), Kwilu (FONAREED, 2018), and Kwango provinces (Omasombo-Tshonda et al., 2012).

Due to the positive correlation between rainfall and plant biomass productivity (Marín et al., 2001), these vast savannahs constitute an important fodder reservoir that enables extensive goat farming is possible.

According to the International Vegetation Classification (IVC), the study area's biome belongs to the “West-Central African Mesic Woodland and Savannah” division, as noted by Faber-Langendoen (2020).

The climate is Aw4, according to Köppen's classification (Lohmann et al., 1993). The region has a tropical-humid Sudanian climate with two contrasting seasons; a 4-month dry season that extends from mid-May to mid-September in the Kinshasa, Kwilu, and Kwango provinces, and can last for five months, extending until mid-October in the Kongo Central province. Average annual temperatures range between 25 and 28 °C, and average annual rainfall is approximately 1400 mm (Biloso, 2008; Omasombo-Tshonda et al., 2012; Lugangu et al., 2018).

3.2.2. Sampling and data collection

One hundred and forty-seven (147) smallholder farmers involved in goat and crop farming were surveyed using a snowball sampling technique, as previously used by

Stark et al. (2016). The sampling entailed making contact first and then gathering more contacts from the current ones. This technique enabled us to contact the smallholder farmers increasingly involved in goat and crop farming in a given territory or village.

Survey data were collected using a questionnaire on the KoboToolbox interface (OCHA, 2019) and by interviewing goat smallholders who were also involved in crop farming. The data collected included personal information (e.g. age, gender, education level, training, etc.), socioeconomic information (financial sources, whether production is market-based or not, familial or salaried labourers, land rented or owned, etc.), and agrotechnical information (e.g. raising and cropping method, etc.).

3.2.3. Statistical analysis

Multiple correspondence analysis (MCA) was performed using FactoMineR, to identify different goat farming systems. This statistical process involved crossing personal, socio-economic and technical variables from the goat farmers surveyed, as a first step to identify those variables that are most strongly correlated ($p < 0.05$) with the factor map axes of the MCA.

Table 3-1. Variables of goat farmers, used for MCA.

Variables	Modality/Label
Age of surveyed farmer	Inf36 = less than 36 years 36a45 = from 36 to 45 years Sup45 = more than 45 years
Gender of surveyed farmer	F = female H = male
fish farming activities	absence presence
Sheep raising	Absence presence
cow raising	Absence presence
pig raising	absence presence
poultry	absence presence

rabbit raising	absence presence
guinea pig raising	absence presence
funding source	self-funding self-funding and external funding
product destination	market and self-consumption market
land structure	fragmented land united land
raising mode	rambling enclosure rearing tethering
Free-ranging feeding	no free-ranging feeding free-ranging feeding
feeding with forage available in the fenced area	no feeding with forage available in the fenced area feeding with forage available in the fenced area
feeding with crop residues	no feeding with crop residues feeding with crop residues
veterinary products	no veterinary products veterinary products rarely used veterinary products regularly used
vegetable gardening	absence presence
chemical fertiliser use	no use of chemical fertiliser use chemical fertiliser
manure use	no use manure Use manure

Thus, the data collected were summarised as active variables (Renisio and Sinthon, 2014), (Table 3-1), enabling a discrimination between different types of goat farms.

These active variables were used automatically to process a hierarchical ascending classification (HAC) with the FactoMineR package, to construct a typology of goat farms, based on their farming practices similarity, which promotes whether or not sustainable intensification of agroecosystem components at the farm or the village scale.

These agroecosystem components and their spatial structures were identified using standard descriptive statistics performed with IBM SPSS Statistics 20.0 regarding their occurrence among goat farmers. Furthermore, the variables significantly associated ($p < 0.05$) with the farmers' practices that are expected to promote the ecological intensification between these agroecosystem components, at the farm or village scale, were identified using the Chi-square test. Finally, the use of these traditional farming practices by goat farmers enabled the construction of an agroecological intensified model, based on various interactions between goat herds and different agroecosystem components.

3.3. Results

3.3.1. Identification of agroecosystem components and their spatial structure

Five components of the agroecosystem were identified among the goat farmers. The (1) animal husbandry and (2) cropland components were exploited by all goat farmers surveyed (100%), whereas 73% exploited the rangeland component (3). Besides these three major components, (4) fish farming (22%) and (5) beekeeping were observed at a marginalised rate (2%).

The spatial structure of the agroecosystem was fragmented in nearly all cases (97%), with an average of 3 ± 1 plots per farmer. For 31% of the goat farmers, each of their plots did not exceed 0.5 ha, while 45% had plots that were 0.5–1 ha each and 24% had plots over 1 ha. The distances between the plots were < 2.5 km for 31% of the goat farmers, 2.5–5 km for 40%, and > 5 km for 29% of goat farmers.

3.3.2. Goat farmer practices that can promote ecological intensification

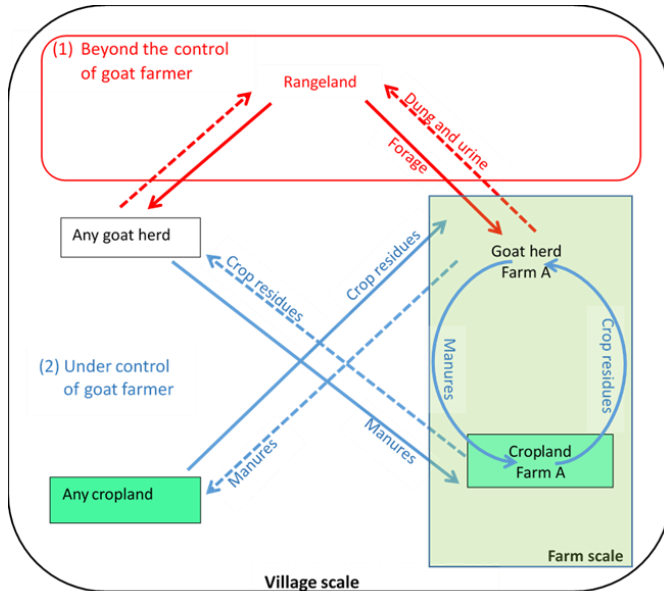


Figure 3-2. Agroecological intensified model of interactions between the three major components of agroecosystem including goat herds, rangelands and croplands

The circular arrows indicate the intra-farm interactions under the control of the goat farmers' practices (2). For example, inside a single farm (farm A), the use of crop residues as animal feed and animal manure as soil fertiliser is the way to sustainable intensification. The straight continuous and the stippled arrows refer to the import and export of manure, crop residues, or forage inside and outside a farm (e.g. farm A). These interactions could be under (2) or out-of-control (1) of the goat farmers' practices.

The conceptual model (Fig. 3-2) illustrates the interactions between goat herds and different agroecosystem components through goat farming practices (Table 3-2).

Table 3-2. Goats farmers' practices promoting nutrient flow between the animal and crop components of the agroecosystem, at farm and village scale

Farming practices	Flow orientation	Users (n)	(%)
Use on-farm animal manure as soil fertiliser	Internal flow	73	50
Use on-farm crop residues as animal feed	Internal flow	78	53
Export animal manure as fertiliser for neighbours' croplands	Exportation (out-flow)	77	52
Export crop residues as animal feed for neighbouring herd	Exportation (out-flow)	6	4
Import animal manure from neighbouring herd as cropland fertiliser	Importation (in-flow)	6	4
Import crop residues from neighbouring cropland as animal feed	Importation (in-flow)	37	25

The survey result revealed that 50% of the farmers used manure from their livestock to fertilise their croplands. All goat farmers who had formal agricultural education or 55% of them who had been trained by NGOs were more likely to use on-farm animal manure to fertilize their croplands. Using animal manure was found among 67% of the farmers who reared both pigs and goats on the same site, 55% of those who had built a night shelter, and even 82% of those who had a vegetable garden less than 2.5 km away from the livestock farm (65%).

Regarding animal feed, 53% of the goat farmers used crop residues to feed their livestock. All smallholder farmers keeping goats in confinement and 95% of those keeping goats tethered in pasturelands used this management practice, which was found among 66% of the goat farmers in urbanised areas. This farming practice was also common among 70% of the goat farmers who had livestock and crops within 2.5 km of each other. In addition, 75% of the female farmers fed crop residues to goats.

In terms of sourcing animal manure, 96% of the goat farmers did not import manure from neighbouring farms to fertilise their croplands, while 4% did. The practice was more common among the goat farmers who had received formal agricultural training or had a vegetable garden. Meanwhile, 25% of the farmers collected crop residues from neighbouring fields to feed their goats. Importing crop residues was most practiced by 85% of the farmers keeping their goats tethered and 65% of those keeping them in confined areas. In addition, 97% and 100% of the farmers who fed crop residues to their livestock, collected sweet potato and cassava residues, respectively.

The provision of livestock manure to neighbouring croplands was also observed among 52% of the smallholder farmers. This practice was common among older farmers (61% over 45 years of age) and among 80% who reared goats in confinement.

3.3.3. Characterisation of the traditional goat farmers

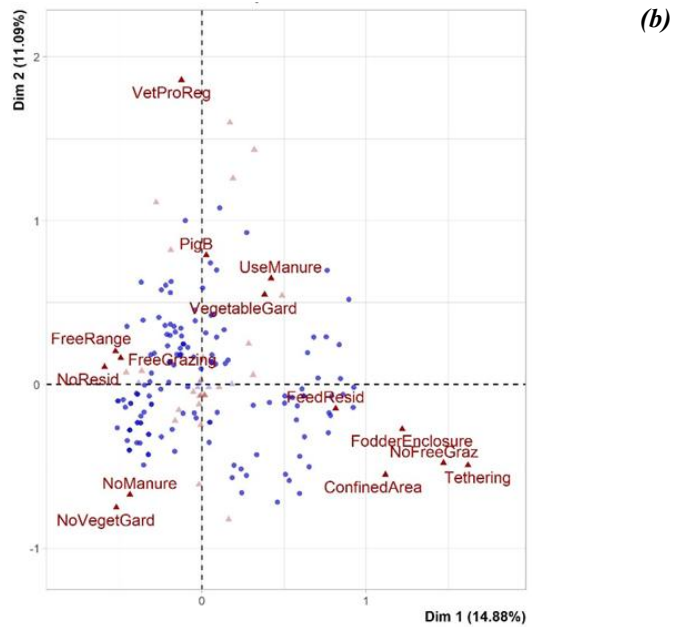
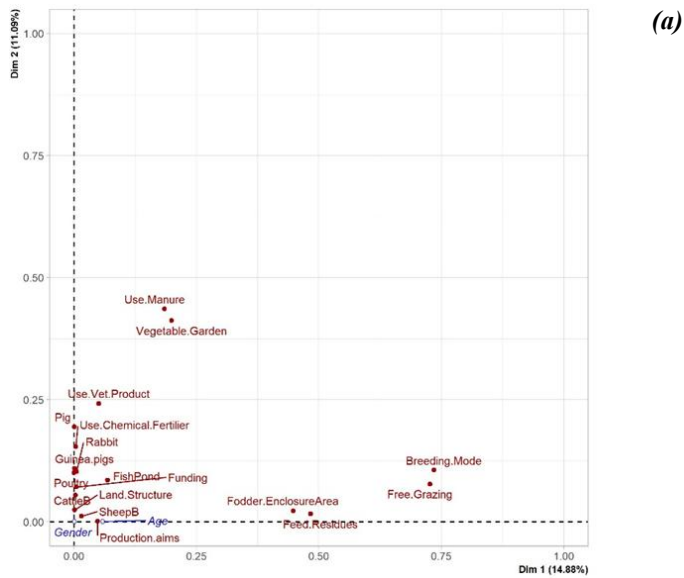


Figure 3-3. Graph of variables and Graph of the variables' modalities

The graph of the variables (Fig. 3-3a) illustrates the level of correlation of farming practice variables with the first and second dimensions of the factor map. The further a variable is away from the origin of the axis, the more it is correlated with the axis in question and allows a better discrimination against the goat farmers. For example, variables related to raising and feeding mode in the first axis (horizontal) and using manure and having a vegetable garden in the second axis (vertical) are the most discriminating variables.

The graph of the modalities of the variables (Fig.3-3b) shows the distribution of the modalities of the farming practices and their closeness among the goat farmers (represented by the distribution of the dashboard).

The figure (3-3a) shows the initial step of characterisation of goat farmers. It illustrates the most discriminating variables, which explained approximately 26% of the total variability among the goat farmers when all the variables relevant to the farming practices were projected onto the first and second dimensions of the factor map. The first dimension (Fig. 3-3a) indicates that the goat rearing and feeding methods allowed clustering goat farmers confidently because of their highest correlation ratios on the factor map axis (0.735 and 0.727), followed by feeding goats with crop residues and forage available in fenced areas, with a medium correlation ratios (0.483 and 0.447). In the second dimension (Fig. 3-3a), the most discriminating variables were “the use of manure” and the crop type (vegetable gardening), with correlation ratios of 0.436 and 0.412, respectively, on the second axis of the factor map.

Regarding smallholder rearing and cropping methods, the MCA (Fig. 3-3b) highlighted that the farmers who allowed their goats to graze freely without providing crop residue supply were unlike those who kept goats confined or tethered and fed them crop residues or forage present in the fenced areas. The second dimension separates farmers who owned vegetable gardens and used animal manure from those who did not.

3.3.4. Typology of goat farming

Based on the most discriminating variables (“feeding method”, “raising method”, “type of crop”, and “using animal manure”), as previously presented in the factor map (Fig.3-3a), the hierarchical ascending classification distinguished three main clusters of goat farmers. Fig. 3-4 illustrates these clusters, and Table 3-3 outlines their key characteristics.

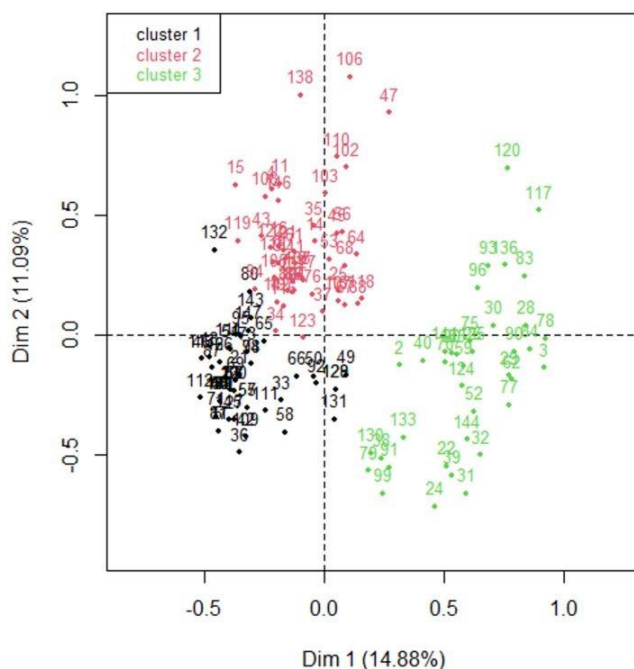


Figure 3-4. Projection of the dendrogram of farmers on the factor map. This dendrogram distinguishes three groups of farmers: black points (1), red-(2), and green-(3)

Table 3-3. Characterisation of the classes according to the discriminant variables of the classification

Discriminating variables	Modalities	% of All respondent	Category 1			Category 2			Category 3		
			% in the Category	V-test*	P value	% in the Category	V-test*	P value	% in the Category	V-test*	P value
Rearing mode	Roaming	72	95	5	< 0.001	100	6	< 0.001	3	-11	< 0.001
	Confined	14	5	-2.4	0.0162	0	-4	< 0.001	46	6	< 0.001
	Tethering	14	0	-4	< 0.001	0	-4	< 0.001	51	8	< 0.001
Free grazing	No	25	2	-5.5	< 0.001	0	-6	< 0.001	92	11	< 0.001
	Yes	75	98	5.5	< 0.001	100	6	< 0.001	8	-11	< 0.001
Feeding with crops residues	No	58	80	4.2	< 0.001	70	2	0.028	10	-7	< 0.001
	Yes	42	20	-4.2	< 0.001	30	-2	0.028	90	7	< 0.001
Feeding with forage in enclosure plot	No	77	95	4.1	< 0.001	89	3	0.009	36	-7	< 0.001
	Yes	23	5	-4.1	< 0.001	11	-3	0.009	64	7	< 0.001
Possessing vegetable gardening	No	42	89	9.2	< 0.001	2	-8	< 0.001			
	Yes	58	11	-9.2	< 0.001	98	8	< 0.001			
Using animal manure	No	49	96	9.5	< 0.001	9	-7	< 0.001			
	Yes	51	4	-9.5	< 0.001	91	7	< 0.001			

(*)The V-test is the level of discrimination of a variable for a category. Variables with p-value < 0.05 and V-test ≥ 2 characterise significantly the category

Table 3-3 shows that in cluster 1, 95% of the farmers reared goats using free-roaming methods, 98% allowed free grazing on natural grasslands and 80% did not provide crop residues. Additionally, 96% of these farmers did not use animal manure as fertiliser, and 89% did not have a vegetable garden.

In cluster 2, all the farmers reared their goats using roaming methods and free-grazing on natural pastures was their feed method, while 70% of them did not provide crop residues. However, 91% used animal manure as a fertiliser for their vegetable gardens, and 98% of the farmers owned vegetable gardens.

Cluster 3, was marked by 51% of farmers who kept their goats tethered and 46% that confined them inside a fenced area. Within cluster 3, 90% of the farmers used crop residue and 64% used forage from the enclosed area as their primary sources of animal feed.

3.4. Discussion

The integration of crop and livestock farming is a pillar of sustainable agriculture, as ecological intensification processes occur between agroecosystem components that interact, and enhance ecosystem services such as nutrient cycling, food and fodder supply; thus, limiting the need for external inputs. At the farm and village scale in the western DRC, 'livestock', 'cropping land' and 'savannahs' were found to be the main components of the agro-ecosystem exploited by goat farmers.

Livestock and crops were mainly grown on natural savannahs or fallow land, with little or no inputs. Such extensive farming, reported by Vall et al. (2014), is widespread in rural areas of the DRC (Omasombo-Tshonda et al., 2012; Mafwila et al., 2018) and elsewhere in SSA (Thornton et al., 2011; Losch, 2016), and is practiced by most farmers for subsistence and income generation. In this regard, 73% of goat farmers used savannah as the main source of animal feed. Thus, the savannah component represents the biggest feed support for goat farming, because of the tropical climatic conditions, allowing high forage biomass production, similar to the findings of Marín et al. (2001) on the agroecosystems of tropical America.

Natural savannah areas provide several ecosystem services, including food for humans and livestock, carbon sequestration, and a habitat for numerous species (Ghaley et al., 2014). The diversified plant species and their high biomass productivity in the tropical savannah of the western DRC provide goats with most of the necessary feed resources and reduce the dependence of goat farmers on external feed resources.

This provision's ecosystem service by the savannah contributes to the ecological intensification process (Struik et al., 2017). In return, goats contribute to the health of the savannah's soil, by leaving behind droppings, that increase the organic carbon and total nitrogen in the soil; N'Dri, (2023), has reported the positive effect of animal manure on soil health.

Besides the three major components—livestock, crop farming, and savannah—22% and 2% of goat farmers owned fishponds and kept honeybees, respectively, ensuring additional components for their agroecosystems and contributing to the diversification of their farming activities. Beekeeping in the acacia agroforestry site of the Batéké upland (Bisiaux et al., 2012), exemplified ecological intensification experienced by goat farmers, enriching the savannah with woody species like acacia. Acacia leaves always provide fresh green fodder throughout all seasons, being particularly important during the dry season when grasses do not produce enough forage biomass for livestock due to limited rainfall.

Although production diversification can ensure the resilience and sustainability of agroecosystems through diverse positive interactions between their components (Vall et al., 2012; Mafwila et al., 2018), the goat farmers' practices did not reveal any direct interactions between fishponds and goat rearing or crop farming leading to sustainable intensification.

In China, for instance, Liu (2023) reported mulberry-based fishponds and fish farming in paddy fields. In the DRC's context, the use of goat manure for fishpond fertilisation, to foster the growth of planktonic algae for fish feed would have made an interesting example of interaction towards ecological intensification between fishpond and livestock components.

The fragmentation of the agroecosystem and the removal of its components are disadvantageous to ecological intensification. Each component rarely exceeded one hectare, as also reported by Mafwila et al. (2017) on the outskirts of Kinshasa, by Vall et al. (2014) on small family farms in Madagascar, and by experts of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2017). Consequently, the remoteness of agroecosystem components presented an additional difficulty for their connection, as smallholder farmers could not easily transport heavy animal manure or crop residues.

Thus, remoteness impairs positive interactions and nutrient flow between fragmented components, by limiting their direct connection. As the nutrient flow on-farm is an important pillar of the sustainable intensification of agriculture (Latruffe et al., 2016; Grillot et al., 2018; Stark et al., 2018; Kuyah et al., 2021), the different agroecosystem components in rural areas in the western RDC should not be located at more than 2.5 km apart. A short distance allows optimal management of the

separated components through goat farmers' practices, that link the crop and livestock components.

The agroecosystem's fragmentation was probably due to the itinerant nature of traditional peasant agriculture. Extensive agriculture requires fertile land when it becomes less productive or is left fallow (Tang et al., 2020; Omasombo-Tshonda et al., 2012). The agroecosystem also becomes fragmented when farmers grow crops that do not meet similar ecological or soil-quality requirements (Baker et Capel, 2011; Mafwila et al., 2017). For example, cassava or maize requires high fertility and depleted soil (Cairns et al., 2013; Mahungu et al., 2014), whereas growing leguminous plants such as groundnuts and cowpeas, in fair or good conditions, can contribute to restoring soil fertility (Acevedo-Siaca et Goldsmith, 2020; Kouadjo et al., 2020).

In contrast, in most farming communities in the western DRC, fragmentation makes it possible to isolate rangelands or pasturelands from croplands to avoid roaming livestock damaging crops.

Despite the fragmentation, the remoteness of agroecosystem components, and the extensive crop and livestock farming, the findings revealed that at least half of the goat farmers acted positively to stimulate interactions between livestock and crop components. These farmers used crop residues as animal feed (53% collected them from their farms) and animal dung as soil fertiliser (50% collected it from their farms, and 52% sourced it from neighbouring farms).

These farming practices are important aspects of the ecological intensification of agriculture, (Stark et al., 2016, 2018; Syampungana et al., 2021) and are well-known in organic farming (Gamage et al., 2023). Similar farming practices that promote the ecological intensification process have been implemented by smallholder farmers in Kinshasa province (Mafwila et al., 2018), Burkina Faso (Vall et al., 2017), Madagascar (Vall et al., 2014) and Kenya (Musafiri et al., 2022).

Using crop residues to feed goats and using their manure as soil fertilizer, promotes nutrient flows between livestock and cropland components, thereby contributing to the ecological intensification within the agroecosystem. On one hand, the smallholders limit the need for external inputs and on the other hand animal manure improves soil health in terms of its biodiversity (microorganism and microbial diversities), leading to nutrient cycling by soil litter decomposition and mineralisation, which is an aspect of ecosystem service as reported by Struik and Kuyper, (2017).

Several factors were positively associated with these goat farmers' practices promoting the ecological intensification process between the crop and livestock

components. The most significant factors were agricultural training, mixed livestock farming (pigs and goats), owning vegetable gardens, the proximity of livestock to cropland, and keeping goats tethered or in a confined area.

Agricultural training appears to have equipped goat farmers with agricultural skills, enabling and empowering them to use crop residues as animal feed and animal manure as soil fertiliser. Mafwila et al. (2017) also reported the importance of such training in Kinshasa province, where the adoption of farming practices likely to lead to ecological intensification was mostly observed among trained smallholder farmers.

Vall et al. (2014) and Ogisi and Begho (2023) highlighted the importance of capacity building through training or providing agricultural information to farmers in the SSA to support the ecological intensification within agroecosystems.

Besides agricultural skills, adding pigs to goat farming could have a positive influence on using manure as fertiliser, since pig manure has a high fertilising value, as reported by Seydoux et al. (2008) and Menzi et al. (2016). Pig manure could especially be beneficial in vegetable gardening, which requires high nitrogen inputs (Neuweiler et Krauss, 2017).

In addition, as noticed by Landis (2017), ecosystem services are strongly influenced by the landscape design of the agroecosystem. In this regard, the proximity between the cropland and livestock plots (distance not exceeding 2.5 km) could positively influence the ecological intensification process because of the easier transportation of manure or crop residues. The use of manure allows for shortening the fallow period, and limiting the risk of further agroecosystem fragmentation: a motivation to change practice in favour of ecological intensification.

The proximity between croplands and livestock plots is advantageous, especially for goat farmers in urbanised areas where goat herds are confined or tethered and fed mainly crop residues. Under such conditions, the goat's freedom to scavenge forage is reduced, especially when tethered and animal welfare is compromised according to the standards of the World Organisation for Animal Health (Garcia, 2017).

Regarding categorisation, smallholder farmers were clustered according to their farming practices, such as "rearing" and "feeding" methods, "type of crops", and "use of fertilisers", which explained 26% of the variability among goat farmers in the western part of DRC. Sraïri et al. (2017) also observed these distinctive practices among oasis farmers in Morocco.

Interestingly, Salas et al. (1988) revealed that, in the West Indies, farmers' age could also influence the typology of stockbreeders based on their raising practices.

In this study, however, age did not seem to be a significant factor influencing goat farmers' practices that promote the ecological intensification process between crop- and livestock components.

The HAC distinguished three clusters of traditional goat farmers (Fig. 3-4). Each category was described with the discriminating characteristics presented in Table 3-3.

In the first cluster, goat farmers completely relied on the spontaneous productivity of different agroecosystem areas such as rangelands, fallow lands, and croplands. Goats were allowed to free range, enabling them to forage for palatable fodder according to their selective behaviour (Lee et al., 2019; Dias-e-Silva et Abdalla-Filho, 2020; Chebli et al., 2022). Such extensive goat farming in the western part of the DRC is similar to that reported by Boval et al. (2012) in the West Indies. Goat farmers in this cluster did not use livestock manure as soil fertiliser because they had neither vegetable gardens to valorise it nor crop residues to feed goats. Such farming practices could not promote at the farm scale, nutrient cycling, which is a pillar of sustainable intensification, as noted by Ghaley et al., (2014); Gonzalez-De-Molina et al., (2017); Struik and Kuyper, (2017) and, Kleijn et al., (2019).

However, having a vegetable garden helped initiate an ecological intensification process in this cluster owing to the high value of goat manure for fertilising vegetable crops. As mentioned by Mafwila et al. (2017) and Vall et al. (2014), it would be better to provide goat farmers with agricultural training to strengthen the ecological intensification process between their agroecosystem components, to reduce their dependence on external inputs.

Even if goat farmers' practices in cluster 1 do not reveal direct evidence of an ecological intensification process at the farm scale, such a situation could be different at the scale of an entire village or territory. At a larger scale (village or territory), the free-roaming goats return their manure in one way or another as soil fertiliser through excretion while moving and foraging on fallow land, rangelands, and even in croplands. Thus, their excreta could be considered positive drivers of the nutrient flows in the agroecosystem components, although nitrogen is quickly lost from animal manure (Nasiru et al., 2014; Maltais-Landry et al., 2018; Chen et al., 2023). Therefore, this issue deserves further investigation to understand the extent of ecological services of free-roaming goats within a given agroecosystem.

The second cluster of goat farmers differs from the first in their use of goat manure as fertiliser in vegetable gardens. As vegetables require fertile, healthy soils, animal manure adds value to the ecological intensification process between the livestock and cropland components, so smallholder farmers are saved from buying external inputs such as chemical fertilisers.

In the last cluster, farmers had total control over their animals by tying goats with a rope or keeping them confined to an enclosed area. This cluster depended on the crop residues used as animal feed. Feeding animals crop residues created a strong link between the livestock and the cropland components, thus regular nutrient cycling on both sides. Such farming systems are also widespread in Guadeloupe and several other African countries (Boval et al., 2017), where farmers must supply livestock with the needed crop residue.

This method could appear as a constraint to increasing livestock population, because of the additional labour required to collect crop residues and green fodder, to move tethered animals from one pasture to another and to monitor animal welfare. Thus, goat farmers in this cluster have to spend a lot more time working than those in the first and second clusters.

Although such systems can be difficult to manage and require complex work, they offer some advantages. Besides the prevention of crop damage by limiting the roaming of goats, farmers in the third cluster can collect more goat manure (not possible when animals are roaming freely) as well as use more crop residues as animal feed. Goat farmers' practices in this cluster contribute to the ecological intensification process between the animal and cropland components of the agroecosystem by limiting the use of external inputs.

3.5. Conclusion

Integrated crop and livestock systems (ICLS) deserve more attention in sustainable agriculture. The ecological intensification process, as one of the pillars of the sustainable intensification of smallholder farming in SSA, could be achieved using the local knowledge of traditional goat farmers' practices. In the western part of the DRC for instance, among the five components of the agroecosystem identified at the farm and village scales, the natural savannah, animal husbandry and cropland components showed a huge potential for ecological intensification process through traditional goat farming practices.

At least half of the goat farmers acted positively to stimulate interactions between livestock and crop components, allowing them to be classified into three clusters. Farmers in the first cluster allow goats to roam freely without animal care or the valorisation of manure or crop residues; this farming practice does not directly contribute to ecological intensification, but it does have an indirect effect when the roaming goats freely gather fodder from savannah, fallow land, and even croplands, leading to the spread of their manure.

The second cluster differs from the first in valorising goat manure for improving soil health, especially for vegetable gardening. Hence, such farming practice contributes directly to the ecological intensification process. The last cluster includes farmers who kept goats tethered or confined to enclosed areas, feeding them mainly with crop residues, and using animal manure on croplands. Such farming practice allowed for positive interaction between livestock and cropland components and contributed to the ecological intensification process in agroecosystems.

Several factors were associated with the farming practices seen among the goat farmers, including agricultural training, vegetable gardening, keeping goats tethered or in an enclosed area and the proximity between the croplands and livestock components.

The results reported here highlight the significance of supporting smallholder farmers through capacity building that includes integrated livestock-cropland management strategies that build on local knowledge and farmers' practices to enhance the ecological intensification process within a given agroecosystem.

To enable smallholder farmers to use their local knowledge to find the best management model attuned to available resources and limit their dependence on external inputs, training on sustainable intensification needs to be expanded.

Traditional management strategies of smallholder farmers, particularly those who promote nutrient flows between agroecosystem components, open up avenues for further research on the transfer of fertility from range land to fallow land or cropping land through herding of goats.

Acknowledgements

The authors would like to thank the ARES-CCD (Académie de Recherche et d'Enseignement supérieur, Comité de Coopération au Développement) for financial support, CAVTK (Centre Agronomique et Vétérinaire Tropical de Kinshasa) for local facilitation and the goat farmers for their collaboration during data collection. Special thanks to Elise Pinnars for her great support.

Declarations of interest: none

Data availability: Data will be made available upon reasonable request.

3.6. Appendix chapter 3.

Tableau 0-4. Profil des éleveurs des caprins

Variables	Modalités	Effectif	%
Genre	Femme	31	21
	Homme	116	79
Niveau d'étude	Non scolarisé	19	13
	Primaire	33	22
	Secondaire	77	52
	Supérieur/Universitaire	18	12
Activités principales	Agriculture	67	46
	Elevage	4	3
	Petit commerce	25	17
	Enseignant	12	8
	Retraités	4	3
	Employés d'une entreprise privée	15	10
	Autoentrepreneur/Artisan	16	11
	Corps médical	2	1
	Pasteur/Prêtre	2	1
Autres espèces élevées en plus des caprins	Ovins	22	15
	Bovins	11	7
	Volaille	119	81
	Lapins	7	5
	Porcins	36	24
	Cobayes	6	4
Résidus utilisés en élevage	Résidus de culture de manioc	78	53
	Résidus de culture de Légume	29	20
	Résidus de culture de maïs	37	25
	Résidus de culture de patate douce	15	10
Statut du foncier	Propriétaire terrien	132	90
	Non propriétaire	15	10

Le profil des éleveurs des caprins révèle qu'élever la chèvre pour les populations rurales en RDC s'inscrit principalement dans une logique de diversification des activités de subsistance plutôt que dans une spécialisation productive. L'élevage des chèvres apparaît comme une composante intégrée dans les exploitations agricoles familiales, où il assure des fonctions économiques, sociales et agronomiques complémentaires, et non principales. Il est majoritairement une activité masculine (79 %), ce qui reflète le rôle prépondérant des hommes dans la gestion du foncier (% de propriétaires terriens) et la prise de décision concernant les activités à entreprendre dans un foyer typique de nombreuses régions rurales de la RDC. Toutefois, une partie non négligeable des femmes (21 %) élève aussi les chèvres. Ceci confirme encore plus que cette activité n'est pas l'exclusivité de la gent masculine, car elle est accessible aux ménages dirigés par des femmes, notamment en raison des faibles exigences en capital et en infrastructures de cette espèce.

Le niveau d'instruction relativement élevé des éleveurs, avec 64 % ayant atteint au moins le niveau secondaire ou supérieur, constitue un atout pour l'adoption de nouvelles pratiques d'élevage susceptibles de favoriser davantage une intégration agriculture-élevage, pour une réduction effective des coûts d'exploitation et des coûts environnementaux. Cependant, la présence de 35 % d'éleveurs ayant un faible niveau d'instruction (primaire ou sans scolarisation) souligne la nécessité d'adapter les programmes de vulgarisation aux réalités socioculturelles locales.

Parmi ces populations, l'agriculture (cultures vivrières et maraichères) représente l'activité dominante (46 %), alors que seulement 3 % des personnes enquêtées déclarent l'élevage comme activité principale. Cette répartition met clairement en évidence le fait que l'élevage caprin n'est généralement pas une activité spécialisée ou professionnelle à temps plein. Il est davantage pratiqué comme une activité complémentaire au sein des systèmes de production familiaux, associée à l'agriculture, au petit commerce ou à d'autres sources de revenus.

Près de la moitié des enquêtés sont avant tout agriculteurs (46 %) alors qu'une part importante exerce d'autres activités génératrices de revenus telles que le commerce (17 %), l'artisanat (11 %), le salariat privé (10 %) ou l'enseignement (8 %).

Cette situation est caractéristique des systèmes agropastoraux familiaux d'Afrique centrale où les ménages cherchent à diversifier leurs sources de revenus et de subsistance afin de réduire les risques liés aux aléas climatiques et économiques. En plus d'élevage caprin, ils pratiquent encore l'élevage d'autres espèces animales comme la volaille (81 %), les porcins (24 %), les ovins (15 %), les bovins (7 %), les lapins et les cobayes (moins de 5 %).

La prédominance de la volaille et des caprins traduit l'orientation des exploitations vers des espèces à cycle court, nécessitant peu d'investissements et adaptées aux ressources limitées des ménages ruraux.

Cette diversité animale est avantageuse car pourrait contribuer à la résilience des exploitations familiales, en répartissant les risques de mortalité, de fluctuation des prix et de disponibilité alimentaire.

L'utilisation de différents résidus de culture constitue un élément central du fonctionnement des systèmes de ces élevages. Plus de la moitié des éleveurs (53 %) utilisent les résidus de manioc, suivis des résidus de maïs (25 %), des résidus maraîchers (20 %) et des résidus de patate douce (10 %).

Le foncier influence aussi fortement la volonté des populations rurales de s'investir dans l'élevage. Dans le contexte de cette étude, 90 % des personnes enquêtées ont déclaré être propriétaires de leurs terres. Cette situation constitue un élément particulièrement favorable au développement de l'élevage caprin, car la sécurité foncière facilite l'IAE au sein de l'exploitation, la production durable des fourrages, l'amélioration des infrastructures d'élevage durables et la planification à long terme de la gestion des ressources naturelles.

Dans le contexte de la RDC, où les conflits fonciers peuvent limiter les investissements agricoles, cette forte proportion de propriétaires suggère un environnement favorable à l'intégration durable agriculture-élevage dans les exploitations familiales. La complémentarité entre ces deux composantes constitue l'un des fondements de la durabilité et de la résilience des systèmes de production ruraux en RDC.

3.7. References

- Acevedo-Siaca, L., Goldsmith, P.D., 2020. Soy-Maize Crop Rotations in Sub-Saharan Africa: A Literature Review. *Int. J. Agron.* 2020, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2020/8833872>
- Altieri, M.A., Funes-Monzote, F.R., Petersen, P., 2012. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: Contributions to food sovereignty. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0065-6>
- Ashit, K.P., Jakia S.M., Fouzia N., 2020. Management practices, reproductive performance and constraints of goat rearing in Bangladesh. *Indian J. Small Rumin.* 20, 138–141. <https://doi.org/10.5958/0973-9718.2019.00055.2>
- Baker, N.T., Capel, P.D., 2011. Environmental factors that influence the location of crop agriculture in the Conterminous United States. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011–5108, Reston, Virginia.
- Biloso Moyenne, A., 2008. Valorisation des produits forestiers non ligneux des plateaux de Bateke en périphérie de Kinshasa (RDCongo). Thèse de Doctorat, ULB, Belgique, 252p.
- Bisiaux, F., Peltier, R., Muliele, J.-C., 2012. Mampu, sur les plateaux Batéké, en R.D. Congo, le projet qui réconcilie Agroforesterie et production de bois-énergie : 8000 ha de jachères enrichies à *Acacia auriculiformis* produisent plus de 8000 T de charbon/an pour la ville de Kinshasa. in: Roose, E., Duchaufour, H., et Georges-De-Noni (éd.), *Lutte Antiérosive. Réhabilitation Des Sols Tropicaux et Protection Contre Les Pluies Exceptionnelles*. IRD, Marseille. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.13775>
- 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. *Eur. J. Agron.* 57, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>

- Bourban, M., 2019. Croissance démographique et changement climatique : repenser nos politiques dans le cadre des limites planétaires. *La Pensée Ecol.* 3, 19–37. <https://doi.org/10.3917/lpe.003.0019>
- Boval, M., Angeon, V., Rudel, T., 2017. Tropical grasslands: A pivotal place for a more multi-functional agriculture. *Ambio* 46, 48–56. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0806-5>
- Boval, M., Coppy, O., Naves, M., Alexandre, G., 2012. L'élevage traditionnel, une source et un support pour l'innovation agroécologique: la pratique du piquet aux antilles. *Courr. Environ. de l'INRA* n°62, Décembre 2012, p87-97.
- Cairns, J.E., Hellin, J., Sonder, K., Araus, J.L., MacRobert, J.F., Thierfelder, C., Prasanna, B.M., 2013. Adapting maize production to climate change in sub-Saharan Africa. *Food Sec.* 5, 345–360. <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0256-x>
- Chebli, Y., El Otmani, S., Hornick, J.-L., Keli, A., Bindelle, J., Cabaraux, J.-F., Chentouf, M., 2022. Forage Availability and Quality, and Feeding Behaviour of Indigenous Goats Grazing in a Mediterranean Silvopastoral System. *Rumin.* 2, 74–89. <https://doi.org/10.3390/ruminants2010004>
- Chen, P., Cheng, W., Li, S., 2023. Optimization strategies for mitigating nitrogen loss in the aerobic composting of pig manure and microbial changes revealed by metagenomic analysis. *Process. Saf. Environ. Protect.* 169, 270–284. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.014>
- Dias-e-Silva, T.P., Abdalla-Filho, A.L., 2020. Sheep and goat feeding behavior profile in grazing systems. *Acta Sci. Anim. Sci.* 43, e51265. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v43i1.51265>
- Dossa, L.H., Sangaré, M., Buerkert, A., Schlecht, E., 2015. Production objectives and breeding practices of urban goat and sheep keepers in West Africa: regional analysis and implications for the development of supportive breeding programs. *SpringerPlus* 4:281 <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1075-7>
- Faber-Langendoen, D., 2020. Tropical, Temperate, and Mediterranean Grasslands of the World. *Encycl. World's Biomes* 424–433. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12093-7>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2021: Rendre les systèmes agroalimentaires plus résilients face aux chocs et aux situations de stress, La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4476fr>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017. The state of food and agriculture. Leveraging food systems for inclusive rural transformation. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2015. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2014: Ouvrir l'agriculture familiale à l'innovation. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Food and Agriculture Organization Statistics (FAOSTAT), 2020. Food and agriculture data. Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.org/faostat. (accessed 5.10.22).
- Fonds National REDD (FONAREED), 2018. Programme intégré REDD+ dans la province de Kwilu - la promotion de l'agroforesterie dans les savanes pour la séquestration de carbone, l'atténuation de la déforestation et l'amélioration de la vie de la population locale (Rapport No. AMI n°15). Fonds National REDD-RDC, Kinshasa.
- Gamage, A., Gangahagedara, R., Gamage, J., Jayasinghe, N., Kodikara, N., Suraweera, P., Merah, O., 2023. Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming Syst.* 1, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100005>
- Garcia, R., 2017. Un seul bien-être: un cadre pour favoriser l'application des normes de l'OIE sur le bien-être animal. *Bull. de l'OIE*, 3–8. <https://doi.org/10.20506/bull.2017.1.2588><https://doi.org/10.20506/bull.2017.1.2588>
- Ghaley, B.B., Porter, J.R., Sandhu, H.S., 2014. Soil-based ecosystem services: a synthesis of nutrient cycling and carbon sequestration assessment methods. *Intern. J. of Biodivers. Sci., Ecosyst. Serv. & Manag.* 10, 177–186. <https://doi.org/10.1080/21513732.2014.926990>

- González-De-Molina, M., Guzmán Casado, G., 2017. Agroecology and Ecological Intensification. A Discussion from a Metabolic Point of View. *Sustain.* 9, 86. <https://doi.org/10.3390/su9010086>
- Gracinda A.M., Visser, C., Siteo, A., 2021. Smallholder Goat Production in Southern Africa: A Review. In : Dubeuf, J.P. (Eds.), *Future Prospects on the Goat Activities for the Coming Decades in the Context of a World in Transition. Goat Science - Environment, Health and Economy.* IntechOpen. London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97792>
- Grillot, M., Vayssières, J., Masse, D., 2018. Agent-based modelling as a time machine to assess nutrient cycling reorganization during past agrarian transitions in West Africa. *Agric. Syst.* 164, 133–151. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.04.008>
- Kleijn, D., Bommarco, R., Fijen, T.P.M., Garibaldi, L.A., Potts, S.G., Van Der Putten, W.H., 2019. Ecological Intensification: Bridging the Gap between Science and Practice. *Trends in Ecol. Evol.* 34, 154–166. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.11.002>
- Kouadjo Paul, A., Hugues Annicet, N., Henri Cousin, G., 2020. Bien cultiver l'arachide et le maïs en rotation. *J. Appl. Biosci.* 146. <https://doi.org/10.35759/JABs.v146.6>
- Kumar, M., Ram, J., Meena, S., Banerjee, A., 2021. Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture. Springer Nature, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3>
- Kuyah, S., Sileshi, G.W., Nkurunziza, L., Chirinda, N., Ndayisaba, P.C., Dimobe, K., Öborn, I., 2021. Innovative agronomic practices for sustainable intensification in sub-Saharan Africa. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 41, 16. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00673-4>
- Lamming, L., 2001. Alternative weed strategies: Successfully Controlling Noxious Weeds with Goats. *Beyond Pestic.* 21, (4), 19-23.
- Landis, D.A., 2017. Designing agricultural landscapes for biodiversity-based ecosystem services. *Basic Appl. Ecol.* 18, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2016.07.005>
- Latruffe, L., Diazabakana, A., Bockstaller, C., Desjeux, Y., Finn, J., Kelly, E., Ryan, M., Uthes, S., 2016. Measurement of sustainability in agriculture: a

review of indicators. *Stud. Agr. Econ.* 118, 123–130.
<https://doi.org/10.7896/j.1624>

Lee, S.-H., Lee, J., Chowdhury, M.M.R., Jeon, D., Lee, S.-S., Kim, S., Kim, D.H., Kim, K.-W., 2019. Grazing Behavior and Forage Selection of Goats (*Capra hircus*). *J. Kor. Grassl. Forage. Sci.* 39, 189–194.
<https://doi.org/10.5333/KGFS.2019.39.3.189>

Liu, X., 2023. Sustainable intensification: A historical perspective on China's farming system. *Farming Syst.* 1, 100001.
<https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100001>

Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, L., Cubasch, U., Perlwitz, J., Roeckner, E., 1993. The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Clim. Res.* 3, 177–193.
<https://doi.org/10.3354/cr003177>

Losch, B., 2016. Structural transformation to boost youth labour demand in sub-Saharan Africa: The role of agriculture, rural areas and territorial development. International Labour Office. (ILO) Employment Policy Dept, Geneva.

Lugangu, M.H., Kunyima, C.K., Kamalandua, L.B., Komanda, J.A., 2018. La problématique des espaces ruraux non intégrés : Une approche géo-sociale des territoires de Kasangulu, Kimvula et Madimba, dans la province du Kongo Central, en République Démocratique du Congo. *Int. J. Innov. Appl. Studies* 24, 1209–1219.

Mafwila, K.P., Kambashi, M.B., Dochain, D., Rollin, X., Mafwila, J., Bindelle, J., 2018. Smallholders' practices of integrated agriculture aquaculture system in peri-urban and rural areas in Sub Saharan Africa. *Tropicultura* 37, 1–18. <https://doi.org/10.25518/2295-8010.1396>

Mafwila, K.P., Kambashi, M.B., Dogot, T., Dochain, D., Rollin, X., Mvubu, R.N., Kinkela, C., Mafwila, J., Bindelle, J., 2017. Diversity of farming systems integrating fish pond aquaculture in the province of Kinshasa in the democratic republic of the Congo. *J. Agric. Rural. Dev. Trop. SubTrop.* 118, 149–160.

Mahungu, N.M., Hangy, K.W.T., Bidiaka, S.M., 2014. Multiplication de materiel de plantation de manioc et gestion des maladies et ravageurs. CGIAR Research Program on Roots, Tubers and Bananas.

<https://www.rtb.cgiar.org/publications/multiplication-de-materiel-de-plantation-de-manioc-et-gestion-des-maladies-et-ravageurs> (accessed 8.3.23) (In french).

- Maltais-Landry, G., Neufeld, K., Poon, D., Grant, N., Nestic, Z., Smukler, S., 2018. Protection from wintertime rainfall reduces nutrient losses and greenhouse gas emissions during the decomposition of poultry and horse manure-based amendments. *J. Air & Waste Manag. Ass.* 68, 377–388. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1409294>
- Marín, D., De Martino, G., Guenni, O., Guédez, Y., 2001. Biomasse et productivité de la strate herbacée des savanes de l'Etat de Guarico (Venezuela). *Fourrag.* 165, 89–102. (In french)
- Menzi, H., Stoll, P., Schlegel, P., 2016. Nouvelles valeurs de référence pour les déjections des porcs. *Rech. Agron. Suisse* 7 (11-12): 484–489. (In french)
- Musafiri, C.M., Kiboi, M., Macharia, J., Ng'etich, O.K., Kosgei, D.K., Mulianga, B., Okoti, M., Ngetich, F.K., 2022. Adoption of climate-smart agricultural practices among smallholder farmers in Western Kenya: do socioeconomic, institutional, and biophysical factors matter? *Heliyon* 8, e08677. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08677>
- Nasiru, A., Ibrahim, M.H., Ismail, N., 2014. Nitrogen losses in ruminant manure management and use of cattle manure vermicast to improve forage quality. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 3, 57. <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0057-z>
- N'Dri, Y.B., Shou-Wei, H., Hao-Ran, L., Yao D.K., Irsa, E., Ahmad, L.V., Yash, P. D., Xin, Z., Hai-Lin, Z., 2023. Effects of fertilizer application strategies on soil organic carbon and total nitrogen storage under different agronomic practices: A meta-analysis. *Land Degrad. Dev.* <https://doi.org/10.1002/ldr.4885>
- Neuweiler, R., Krauss, J., 2017. Fertilisation des cultures maraîchères. Ed. Recherche Agronomique Suisse publication spéciale, Suisse. (In french)
- Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA), 2019. Manual Kobo Toolbox. Office for the Coordination of Humanitarian Affairs in West

and Central Africa. <https://www.kobotoolbox.org/#home> (accessed 5.7.22)

Ogisi, O.D., Begho, T., 2023. Adoption of climate-smart agricultural practices in sub-Saharan Africa: A review of the progress, barriers, gender differences and recommendations. *Farming Syst.* 1, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100019>

Omasombo-Tshonda, J., Zenga, K.J., Leonard, G., Mpene, N.Z., Zana, E.M., Edwine, S., Krawczyk, J., Laghmouch, M., 2012. Kwango : le pays des Bana Lunda, Le Cri édition, Bruxelles.(In french)

Renisio, Y., Sinthon, R., 2014. L'analyse des correspondances multiples au service de l'enquête de terrain: Pour en finir avec le dualisme « quantitatif »/« qualitatif ». *Genèses* 4 (97) 109–125. <https://doi.org/10.3917/gen.097.0109> (In french)

Rufino, M.C., Verhagen, A., Hengsdijk, H., Langeveld, J.W.A., Ruben, R., Dixon, J.M., Giller, K.E., 2008. Low-cost economic and environmental performance assessment of farm households systems: Application to mixed crop-livestock systems in the ethiopian highlands. *J. Sust. Agric.* 32 (4) 565–595. <https://doi.org/10.1080/10440040802257413>

Salas, M., Planchenault, D., Roy, F., 1988. Etude des systèmes d'élevage bovin traditionnel en Guadeloupe , Antilles françaises . Résultats d 'enquêtes. *Rev. Elev. Méd. Vet. Pays trop.*, 41 (2), 197–207. (In French)

Sejian, V., Silpa, M.V., Chauhan, S.S., Bagath, M., Devaraj, C., Krishnan, G., Nair, M.R.R., Anisha, J.P., Manimaran, A., Koenig, S., Bhatta, R., Dunshe, F.R., 2021. Eco-Intensified Breeding Strategies for Improving Climate Resilience in Goats. In: Kumar, M., Ram, J., Meena, S., Banerjee, A. (Eds), *Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture*. Springer Nature, Singapore, pp. 627-655. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3_18

Seydoux, S., Côté, D., Gasser, M.O., 2008. Caractérisation des lisiers de porcs: Volumes, teneurs et charges fertilisantes. *Agro Solutions* 19 (1): 39–48. (In french)

Shivakumara, C., Reddy, B.S., Patil, S.S., 2020. Socio-economic characteristics and composition of sheep and goat farming under extensive system of

rearing. *Agric. Science Digest* 40 (1) 105–108.
<https://doi.org/10.18805/ag.D-5006>

- Sraïri, M.T., Azahra M'ghar, F., Benidir, M., Bengoumi, M., 2017. Analyse typologique de la diversité et des performances de l'élevage oasien. *Cah. Agric.* 26. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017002> (In french)
- 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. *Eur. J. Agron.* 80, 9–20.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.004>
- 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. *Agron. Sust. Dev.* 38.
<https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x>
- Struik, P.C., Kuyper, T.W., 2017. Sustainable intensification in agriculture: the richer shade of green. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 39.
<https://doi.org/10.1007/s13593-017-0445-7>
- Syampung, S., Handavu, F., Chama, L., Ouma, K., Matakala, N., Chabu Sumba, Siachoono, S., Kapinga, K., Chirwa, P.W.C., 2021. Ecological Intensification: Towards Food and Environmental Security in Sub-Saharan Africa, in: Kumar, M., Ram, J., Meena, S., Banerjee, A. (Eds), *Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture*. Springer Nature, Singapore, pp. 597–625.
https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3_17
- Tang, K.H.D., Yap, P.-S., 2020. A Systematic Review of Slash-and-Burn Agriculture as an Obstacle to Future-Proofing Climate Change. *Proceedings of the 4th International Conference on Climate Change*, Vol. 4, Issue 1, 2020, pp. 1-19.
<https://doi.org/10.17501/2513258X.2020.4101>
- Thomaz, E.L., 2017. High fire temperature changes soil aggregate stability in slash-and-burn agricultural systems. *Sci. agric.* 74, 157–162.
<https://doi.org/10.1590/1678-992x-2015-0495>

- Thornton, P.K., Jones, P.G., Ericksen, P.J., Challinor, A.J., 2011. Agriculture and food systems in sub-Saharan Africa in a 4°C+ world. *Philos. Trans. R. Soc. A* (2011) 369, 117–136. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0246>
- Vall, E., Koutou, M., Blanchard, M., Coulibaly, K., Diallo, M.A., Andrieu, N., 2012. Intégration agriculture-élevage et intensification écologique dans les systèmes agrosylvopastoraux de l'Ouest du Burkina Faso, province du Tuy. Nov 2011, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. In: Vall E., Andrieu N., Chia E., Nacro H B. (Eds.), *Actes de Séminaires, Partenariat, Modélisation, Expérimentations : Quelles Leçons Pour La Conception de l'innovation et l'intensification Écologique?* Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, pp.1-13
- 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. *Cah. Agric.* 26. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017011>
- Vall, E., Salgado, P., Corniaux, C., Blanchard, M., Dutilly, C., Alary, V., 2014. Changements et innovations dans les systèmes d'élevage en Afrique. *INRA Product. Anim.* 27, 161–174. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2014.27.2.3064>
- Van Vliet, N., Mertz, O., Heinemann, A., Langanke, T., Pascual, U., Schmook, B., Adams, C., Schmidt-Vogt, D., Messerli, P., Leisz, S., Castella, J.-C., Jørgensen, L., Birch-Thomsen, T., Hett, C., Bech-Bruun, T., Ickowitz, A., Vu, K.C., Yasuyuki, K., Fox, J., Padoch, C., Dressler, W., Ziegler, A.D., 2012. Trends, drivers and impacts of changes in swidden cultivation in tropical forest-agriculture frontiers: A global assessment. *Glob. Environ. Change* 22, 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.009>

Chapitre 4

**Cartographie, suivi et évaluation des
consommations fourragères des chèvres
dans les agroécosystèmes exploités**

Ce chapitre est l'intégralité de l'article :

Ndona, A., Kikufi, A., Lutete, E., Kambashi, B., Moulin, C.-H., Beckers, Y., & Bindelle, J. (2025). Identification and evaluation of agroecosystem compartments as forage sources for free-ranging goats in smallholder farming systems of western Democratic Republic of Congo. *Veterinary and Animal Science*, 30, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2025.100524>

Abstract

Free-ranging goats forage across multiple agroecosystem compartments, thereby contributing to nutrient redistribution. Despite their importance in nutrient flows, little is known about how these compartments support goat diets or their spatial structure. This study addresses this gap by identifying, mapping, and characterising the agroecosystems exploited by free-ranging goats and by assessing the contribution of each compartment to their daily diet. Twelve adult female goats from local herds were monitored during the dry and rainy seasons for three consecutive days at four sites, using GPS collars combined with drone surveys and direct observations. Two observers were assigned to each goat: one, equipped with a stopwatch and tracking sheet, recorded feeding stations, forages consumed, and biting times; the other, using a Sony HDR-CX405 camera, documented biting behaviour.

Drone-based mapping revealed five compartments of the foraging area: croplands (6.1%–14.8%), fallow lands (2.7%–12.5%), rangelands (36.4%–69.7%), residue supply areas (9.8%–46.7%), and hedgerows (0.1%–5.4%). The agroecosystem landscapes were highly fragmented (24–54 patches/ha) and exhibited SHDI values ranging from 0.94 to 1.19. Goats consumed 57 forage species, dominated by grasses (17%) and legumes (9%), with the remaining 74% spanning 31 botanical families. The integration of GPS tracks with land-use maps and direct observations revealed that rangelands and agricultural lands were the primary contributors to free-ranging goats' daily dry matter intake and forage species diversity. The marked heterogeneity and floristic richness of these agroecosystems underpin their importance as key forage sources supporting smallholder free-range goat farming in western Democratic Republic of Congo.

Keywords: Drone-based map, goat foraging behaviour, free-ranging system, forage sources, forage quality

Highlights:

- Agroecosystems are highly fragmented and heterogeneous, with diverse landscape structures
- Agricultural lands and rangelands are the main forage sources for free-ranging goats
- Free-ranging goats consume a wide diversity of forage species of varying nutritional quality
- Grasses and legumes are the dominant botanical groups in goat diets
- The rainy season provides free-ranging goats with higher forage quality and intake

4.1. Introduction

Terrestrial ecosystems have been under increasing human pressure since the Green Revolution, largely owing to rising global food demand (Foley et al., 2011; Barnosky et al., 2012; Bourban, 2019). Subtropical savannahs are among the most intensively exploited ecosystems because of their multifunctional role in supporting food production (Boval et al., 2017; IPBES, 2018; Kuyah et al., 2021). However, they are also highly vulnerable to degradation resulting from unsustainable practices such as slash-and-burn agriculture with short fallow periods (Boval et al., 2017; Mishra et al., 2021; Karume et al., 2022), high-intensity fires used for rangeland management, uncontrolled wildfires (McNew et al., 2023), and inappropriate afforestation strategies (Veldman et al., 2015; Fernandes et al., 2016). These practices compromise key ecosystem services—such as nutrient cycling, biodiversity, and food web stability—threatening long-term crop and livestock productivity and the livelihoods of local communities in sub-Saharan Africa (SSA), especially under the pressures of climate change.

Barnosky et al. (2012) emphasise the urgent need to address the root causes of anthropogenic global change and to strengthen biodiversity and ecosystem service management, noting that ecosystems often fail to recover once critical disturbances occur.

In SSA, smallholder farmers rely heavily on extensive agriculture, and livestock production is embedded within natural savannah ecosystems (Callo-Concha et al., 2013; Losch, 2016; Orina et al., 2024). There is a pressing need for research focused on the multifunctional roles of these ecosystems (Lemaire et al., 2014; Boval et al., 2017) because significant nutrient export through crop and livestock production leads to soil degradation and loss of fertility. However, free-ranging livestock return a fraction of nutrients through dung and urine while foraging, thereby playing a significant role in maintaining soil fertility (Augustine et al., 2003; Rufino et al.,

2006; Grillot et al., 2018; Huruba et al., 2018), although the extent of this contribution remains poorly documented.

Agroecological farming practices that enhance interactions among soil, plants, and animals through efficient nutrient recycling are considered viable strategies for preserving ecosystem health and ensuring sustainable food production (Muramoto et al., 2000; Bonaudo et al., 2014; Altieri et Nicholls, 2020; Altieri et al., 2024; Audouin et al., 2024). Integrated crop–livestock systems (ICLS) exemplify such agroecological practices, supporting sustainable intensification within agroecosystems by improving nutrient recycling through the management of manure and crop residues. These practices reduce dependence on external inputs and enhance resilience to the impacts of climate change (Rufino et al., 2009; Bonaudo et al., 2014; Stark et al., 2016; Grillot et al., 2018; Stark et al., 2018; Steinmetz et al., 2021).

However, livestock management strategies vary across agroecological zones, shaped by differences in land-use allocation and pressure, feed resource availability, and territorial planning (Rufino et al., 2006). This results in diverse ICLS configurations and a range of potential strategies and designs. In the free-ranging systems common in SSA, livestock govern nutrient flows and act as key contributors to soil fertility in both savannah and cultivated lands (Rufino et al., 2006; Audouin et al., 2024).

Animal diet composition directly influences the quality and quantity of nutrients returned to the soil via excreta (Rufino et al., 2006). Therefore, assessing forage potential in terms of species diversity, nutritional value, and biomass productivity is critical for developing livestock management strategies that promote the sustainable use of tropical savannah ecosystems (Huruba et al., 2018). Such assessments are particularly important for improving understanding of nutrient transfer from grazing areas to cropland (Audouin et al., 2024), especially in the context of ICLS.

Among livestock, goats are a common species in rural areas of SSA because of their adaptability to diverse and harsh environments, as well as their compatibility with extensive farming systems that require low feed and management inputs (Dossa et al., 2008, 2015; Gasigwa Sabimana et al., 2018; Sejian et al., 2021; Andre Mataveia et al., 2023).

In the Democratic Republic of Congo (DRC), goat farming relies almost entirely on natural forages within agroecosystem landscapes, with herders occasionally providing limited supplementation using crop residues (Gasigwa Sabimana et al., 2018; Wasso et al., 2019; Ndonga et al., 2024). Despite this dependence, little is known about the structure of these agroecosystem landscapes and their contribution to the daily diets of free-ranging goats. Addressing this knowledge gap is essential

for evaluating the role of free-ranging goats as potential nutrient drivers within an agroecosystem, in line with ICLS principles. We therefore hypothesise that under free-range farming conditions, goats exploit multiple agroecosystem compartments but these compartments contribute unequally to their daily diets.

Accordingly, this study aimed (1) to map and characterise the agroecosystems exploited by free-ranging goats, with particular attention to identifying the main compartments of the foraging area (CoFA); (2) to assess and compare the individual contribution of these CoFA to the goats' daily dry matter intake (DMI); (3) to record and identify the forage species consumed; and (3) to evaluate the quantity and quality of the daily goat diet in terms of DMI, forage species diversity, acid detergent fibre (ADF), neutral detergent fibre (NDF), crude protein (CP) content, and digestibility.

On one hand, these parameters indicate diet quality and act as proxies for nutrient recycling, providing insights into the quantity and quality of nutrients returned to the soil through goat excreta. Such knowledge is crucial for developing sustainable management strategies that enhance nutrient flows within agroecosystem compartments.

On the other hand, free-ranging goats often damage crops and provoke land-use conflicts between herders and farmers, as observed in rural areas of the DRC and across SSA. Mapping CoFA and identifying the forages consumed could therefore help inform alternative management strategies that regulate access to these CoFA, secure animal nutrition, and mitigate potential farmer–herder conflicts.

4. 2. Materials and methods

4.2.1. Study area

Four sites were selected for this study: the Masamuna, Mosango, Ngeba, and Kikola villages, located in the western provinces of the DRC (Fig. 1). The Ngeba village (5°11' S, 15°12' E) and the Kikola village (5°06' S, 15°06' E) are situated in Kongo Central province, while the Masamuna (4°48' S, 17°37' E) and Mosango (4°50' S, 18°06' E) villages lie within Kwilu province. These study areas share a similar ecosystem pattern characterised by partly cropped savannahs interwoven with gallery forests that thrive along riverine and wetland habitats (Ndona et al., 2024).

According to the International Vegetation Classification, the biome of these study areas belongs to the West-Central African Mesic Woodland and Savannah division

(Faber-Langendoen, 2020). These savannahs constitute an important source of fodder and serve as a vital resource for extensive goat rearing. Following Köppen's classification (Lohmann et al., 1993), the climate is categorised as Aw4. The regions experience a tropical–humid Sudanian climate with two distinct seasons.

The dry season lasts for approximately 4 months, from mid-May to mid-September, in Kwilu province (Mosango and Masamuna villages). In Kongo Central province (Ngeba and Kikola villages), it can extend up to 5 months, until mid-October. The rainy season spans roughly 8 months. Mean annual temperatures range between 25°C and 28°C, with an average annual rainfall of approximately 1,400 mm (Gasigwa Sabimana et al., 2018; Vangu et al., 2023).

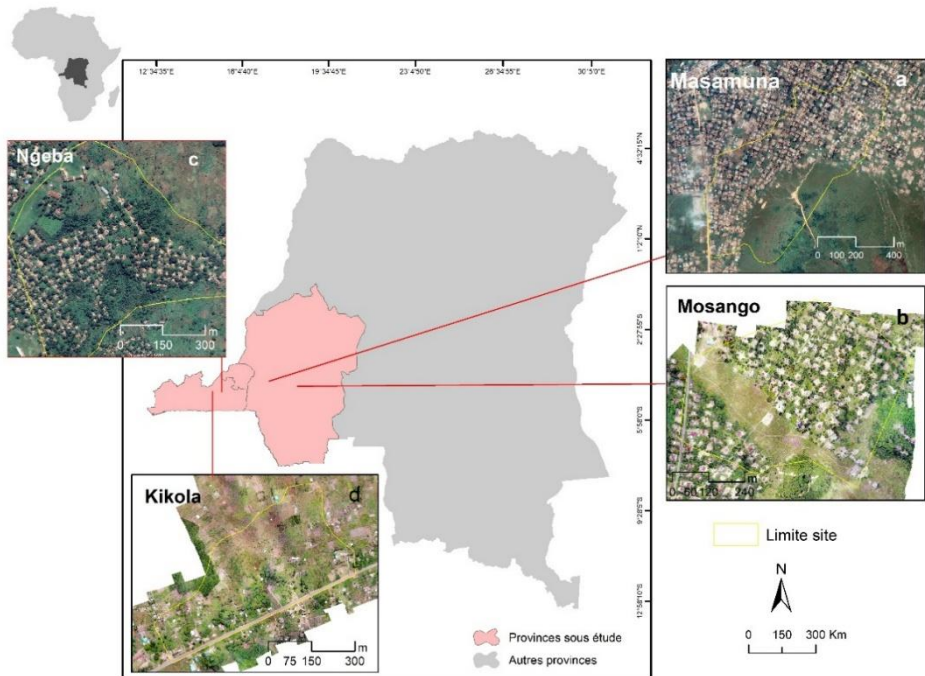


Figure 4-1. Study area

4.2.2. Experimental design

In each village, three female adult goats (27 ± 1.9 kg) were selected from local herds. All had given birth at least once and were raised under typical local free-range farming conditions. Each goat was fitted with a GPS collar (Fastrax UP 501; Fastrax Ltd., Finland) to record its location while foraging across the agroecosystem from 8:00 am to 5:30 pm each grazing day, over 3 consecutive days, during both the dry

(July–August) and rainy seasons (March–April). The GPS recorded the animal's position every 5 minutes. The University of Liège ethics committee (No. 19-2116, Liège, Belgium) approved the use of tracking devices as appropriate from an animal experimentation perspective (Dumortier et al., 2021). The outermost georeferenced points recorded by the GPS were used to delineate the boundaries of the area grazed by the goats. However, a 200-m buffer was added to the mapped boundary to ensure adequate representation of the grazing area, as goats may occasionally move beyond the recorded limits due to their selective foraging behavior.

Additionally, two observers were assigned to monitor and supervise each goat during the three free-grazing days, for approximately 9 hours per day (Zampaligré et al., 2013), from 8:00 am to 5:30 pm, following a 3-day familiarisation period as recommended in previous studies (Agreil & Meuret, 2004; Feldt & Schlecht, 2016; Vandermeulen et al., 2018; Chebli et al., 2020). One observer was equipped with a stopwatch and a daily monitoring sheet to record the duration of biting behaviour at feeding stations, the name and part of the forage plants consumed, and the CoFA where the foraging occurred (e.g. cropland, fallow land, grassland, etc.) (Barroso et al., 2000; Zampaligré et al., 2013). The observer also noted the duration of resting periods.

The second observer simultaneously recorded direct visual observations of goat biting behaviour using a Sony HDR-CX405 2.29 Mpix camera with 60× optical zoom. Consumed forages were documented under their vernacular or local names as ethnobotanical data (Ayantunde et al., 2008), and specimens were collected for identification in the herbarium of the Plant Ecology and Systematics Laboratory at the University of Kinshasa, Lemba, DRC (Kembelo et al., 2021; Ouachinou et al., 2017).

Finally, on the third day of data collection, an aerial photography survey was carried out at a flight altitude of 80 m using a DJI Mavic Pro 2 unmanned aerial system (UAS) equipped with a 1-inch 20-megapixel CMOS sensor and an adjustable focal aperture ranging from f/2.8 to f/11, along with a 77-degree field of view lens. The purpose of this aerial survey was to complement direct observations by producing high-resolution orthophotos that captured detailed imagery of the foraging areas across the agroecosystems exploited by the goats.

4.2.3. Data collection and processing

Aerial photographs were processed using Agisoft Metashape photogrammetry software to generate orthomosaics of the surveyed agroecosystems. The main steps included image alignment, generation of a dense point cloud, and extraction of the orthomosaic (Sherwood et al., 2018; Hatcher et al., 2020; Over et al., 2021). The resulting orthomosaics had a spatial resolution of 0.05 m based on the WGS 1984

UTM Zone 33S projected coordinate system. These were then used to map and characterise the agroecosystem compartments.

A land use and land cover (LULC) map of each agroecosystem was produced by digitising the UAS-derived orthomosaics. Automatic classification was not applied because the presence of non-essential objects (e.g. house roofs with multiple colours) created radiometric classes that were difficult to distinguish, and some agroecosystem compartments showed strong spectral similarity (e.g. rangelands and fallow lands). Instead, objects were visually and manually labelled during polygon digitisation. A vector layer of polygons was created to represent objects or reference classes irrespective of pixel values (Dupuy et al., 2022; Jolivot & Dupuy, 2023). Houses, trees, and palm stands were digitised as distinct LULC classes but were not considered as CoFA.

The CoFA classes were then characterised using the Patch–Matrix Model (Lausch et al., 2015), which describes the spatial structure of a landscape. Following Plexida et al. (2014), a limited set of six landscape metrics was applied to capture heterogeneity within the agroecosystems exploited by goats: patch density (the number of CoFA patches per hectare), CoFA index (the percentage of the agroecosystem area occupied by a CoFA class), mean patch size \pm standard deviation (the area of a CoFA class divided by its number of patches), minimum and maximum patch sizes per CoFA class, CoFA richness (the number of distinct CoFA classes), and Shannon Diversity Index (SHDI).

Goat GPS tracks were then superimposed onto the LULC maps. For each goat, the time spent on each CoFA was calculated from the georeferenced points automatically recorded at 5-minute intervals. Because of land-use dynamics, with frequent shifts between fallow and cropped field classes, both were grouped under the category “agricultural land”.

Daily DMI was estimated indirectly using the hand-plucking method, which mimics the bites taken by grazing goats (Bonnet et al., 2015; Chebli et al., 2020). This method considered three main parameters: feeding time (FT; duration of forage collection), bite mass (BM; average dry mass of forage per bite), and bite rate (BR; number of bites per unit time). DMI was then calculated using Equation (1):

$$\text{DMI (g d}^{-1}\text{)} = \text{BM} \times \text{BR} \times \text{FT} \quad (\text{Eq. 1})$$

Each variable in the equation was determined experimentally. BM for each forage species was estimated using the hand-plucking simulation method, which involved manually collecting portions of forage to replicate goat grazing behaviour. For each recorded forage species, at least 100 hand-plucking repetitions were performed. The collected samples were weighed fresh and then oven-dried at 60°C until a constant

dry weight was achieved. The average BM for each forage species was calculated by dividing the total dry mass by the number of hand-plucking replicates:

$$BM = \frac{\text{Mass of dried sample}}{\text{Number of hand-plucking simulations}} \quad (\text{Eq. 2})$$

The BR was determined from direct observation of the videos captured by the second observer. These videos were processed using VSDC professional video editing software (Lee & Kim, 2023). A minimum grazing sequence of 20 seconds on the forage plant consumed was randomly selected for each goat that had fed on it, resulting in at least 240 seconds of mixed footage per forage species. By replaying the footage in slow motion, the number of bites taken by the goats on the forage plant in question was accurately counted over the 240-second observation period.

The FT for collecting feed resources was defined as the period during which bites were taken on forage plants. This time excluded all other activities not related to forage collection, such as walking between locations within different CoFA, resting, or ruminating.

The CoFA within the agroecosystem were identified and mapped using UAS-generated orthomosaics. Geolocation data from the goats revealed the time spent on each CoFA, while direct observations confirmed the forage species consumed and recorded the time goats allocated to each species while grazing. Taking the CoFA into account, the data collected allowed the daily intake equation to be adapted as follows:

$$DMIT \text{ (g d}^{-1}\text{)} = \sum_{i=1}^n DMI \text{ CoFA}_i \quad (\text{Eq. 3})$$

where

- DMIT (g d⁻¹) = total daily DMI (in grams per day)
- DMI CoFA_i = daily DMI within a single CoFA (in grams per day)

Within each CoFA, the daily intake was determined using Equation (4):

$$DMI \text{ CoFA (g d}^{-1}\text{)} = \sum_{j=1}^m DMI \text{ Sp}_j \quad (\text{Eq. 4})$$

where

- DMISp_j = daily intake of each forage species (grams per day) consumed within a single CoFA.

At this step, we referred to Equation (1) to estimate DMI_{Sp_j} , expressed using Equation (5) as follows:

$$DMISp_j = BTSp_j \times BFSp_j \times BMSp_j \quad (\text{Eq. 5})$$

where

- $BTSp_j$ = total time spent by the animal collecting forage species j within the same CoFA during a grazing day (Eq. 6)
- $BFSp_j$ = average bite frequency on forage plant j (Eq. 8)
- $BMSp_j$ = mass of a bite on forage plant j (Eq. 9).

The total time spent by the animal collecting forage species j within the same CoFA during a grazing day ($BTSp_j$) was calculated using Equation (6):

$$BTSp_j = \left(\frac{BTvis Sp_j}{\sum_{j=1}^m BTvis Sp_j} \right) \times (T_{gps CoFA_i} - T_{rest CoFA_i} - T_{walk CoFA_i}) \quad (\text{Eq. 6})$$

where

- $BTvis Sp_j$ = time recorded by the observer (visual observation) that the goat spent in $CoFA_i$ collecting forage species Sp_j
- $\sum_{j=1}^m BTvis Sp_j$ = total time recorded by the observer (visual observation) spent in $CoFA_i$ collecting all forage species consumed
- $T_{gps CoFA_i}$ = time recorded by the goat's GPS collar within a single $CoFA_i$ while foraging
- $T_{rest CoFA_i}$ = non-grazing and/or resting time recorded by the observer within $CoFA_i$
- $T_{walk CoFA_i}$ = time allocated to walking within $CoFA_i$ (Eq. 7)

The walking time within a CoFA ($T_{walk CoFA_i}$) was calculated using Equation (7):

$$T_{walk CoFA_i} = \frac{D_{gps}}{S} \quad (\text{Eq. 7})$$

where

- D_{gps} = distance walked within $CoFA_i$, recorded automatically by the goat's GPS collar
- S = walking speed of the goat when not collecting forage, estimated at 50 m min^{-1} (Meuret et al., 1985)

The average bite frequency on forage plant j ($BFSp_j$) was then determined using Equation (8):

$$\text{BFS}_{pj} = \frac{\text{NBS}_{pj}}{t} \quad (\text{Eq. 8})$$

where

- NBS_{pj} = number of bites counted on forage plant j by replaying the grazing footage in slow motion using VSDC Video Editor
- t = time spent making these bites

Finally, the mass of a bite on forage plant j (BMS_{pj}) was obtained using Equation (9):

$$\text{BMS}_{pj} = \frac{\sum_{k=1}^l \text{BMS}_{\text{simul}}}{l} \quad (\text{Eq. 9})$$

where

- l = number of hand-plucking repetitions performed on the consumed part of forage plant j
- $\sum_{k=1}^l \text{BMS}_{\text{simul}}$ = total dry weight (g) of the l hand-plucking repetitions for forage plant j

4.2.4. Forage sample analyses

Hand-plucked forage samples, previously collected to estimate BM and oven-dried at 60°C, were subsequently ground to pass through a 1-mm mesh sieve (Cyclotec 1093 Sample Mill; FOSS Electric, A/S, Hillerød, Denmark). The samples were then sent to the Laboratory of Precision Livestock and Nutrition, Gembloux Agro-BioTech (Liège University), for chemical analysis. NDF and ADF values were determined following the methodology outlined by Van Soest et al. (1991). The *in vitro* digestibility of organic matter was assessed using an enzymatic procedure involving pepsin and cellulase, according to the method described by Aufrere (1982). Total nitrogen content was determined using the Kjeldahl method (AOAC method 981.10; AOAC, 1990), and CP was calculated as $\text{N} \times 6.25$.

4.2.5. Statistical analysis

Descriptive statistics were used to characterise the agroecosystems exploited by free-ranging goats. To assess the effects of site, season, and their interaction on daily DMI, diet quality (CP, ADF, NDF, and digestibility), and the daily number of forage species consumed, a two-way analysis of variance (ANOVA) was performed, provided that the assumptions of normality and homogeneity of variances were met (using the Kolmogorov–Smirnov and Levene tests), with the car package implemented in R Core Team's (2024) RStudio version 4.4.2. If these assumptions

were violated, a two-way aligned rank transform (ART) ANOVA was conducted using the ARTTool package as an alternative to the F-test (Kay & Wobbrock, 2016). Following either the ANOVA or ART ANOVA, Tukey's post-hoc test was applied to identify significant differences ($p < 0.05$) within site and season groups.

To evaluate and compare the contribution of different CoFA to daily DMI, grazing time, and consumed forage diversity, a three-way ART ANOVA was performed, considering season, site, and CoFA as fixed factors, including the interaction term season \times CoFA. Tukey's post-hoc test was again used to detect significant differences ($p < 0.05$) between CoFA classes.

4.3. Results

The spatial structure of the agroecosystems across the four study sites (Fig. 2) revealed five distinct land-use classes exploited by free-ranging goats as CoFA. These compartments, described in Table 1, were croplands (comprising annual crops and vegetable gardens under active cultivation); fallow lands (post-cultivation areas), both of which constituted agricultural land; rangelands and natural vegetation (dominated by herbaceous species); green hedgerows (featuring woody or herbaceous perennial species used as plot borders); and residue supply areas (areas lacking vegetation cover, such as house halls, front or back yards, where goats consumed crop residues or household organic waste). Despite a moderate diversity of compartments, as indicated by SHDI values close to 1 (Table 1), the agroecosystems exploited by the goats were highly heterogeneous across all sites. Masamuna showed the highest fragmentation index (54 CoFA patches per hectare), whereas the other sites ranged between 24 and 31 patches per hectare.

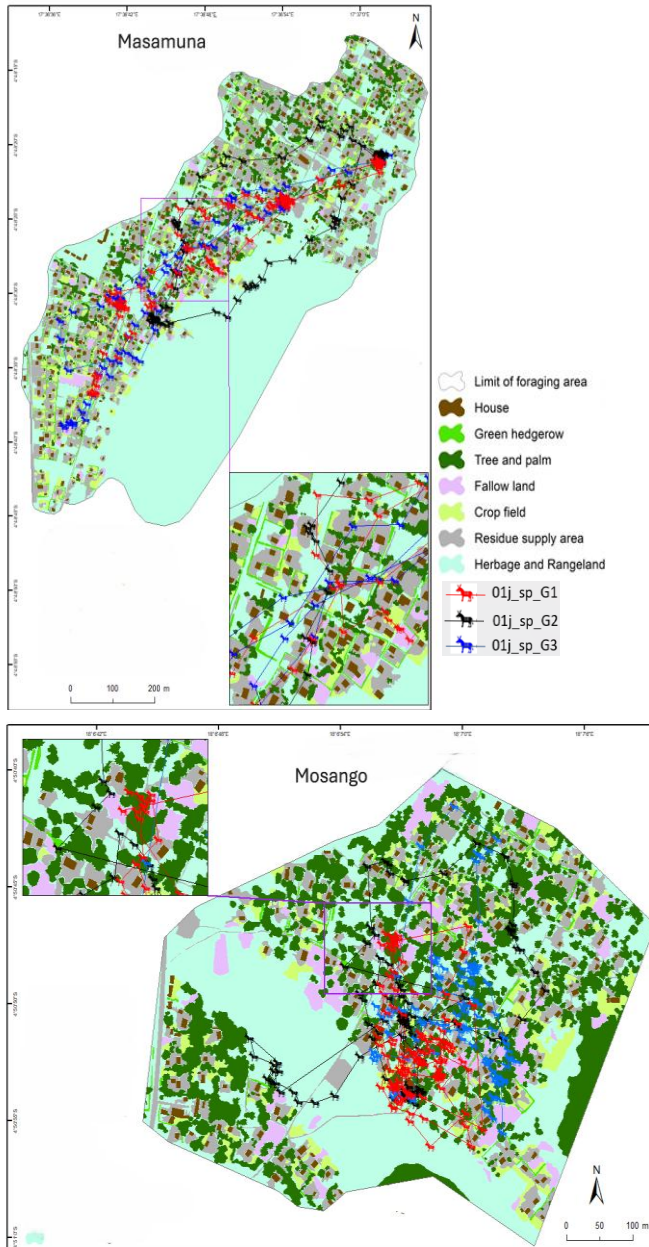


Figure 4-2 a. Land use and land cover maps illustrating the spatial configuration of compartment of foraging area (CoFA) within the agroecosystems exploited by free-ranging goats. The red, blue, and black lines exemplify georeferenced movement tracks recorded by GPS-collared goats (G1, G2, and G3) on day 1 of monitoring in rainy season at the Masamuna and Mosango sites.

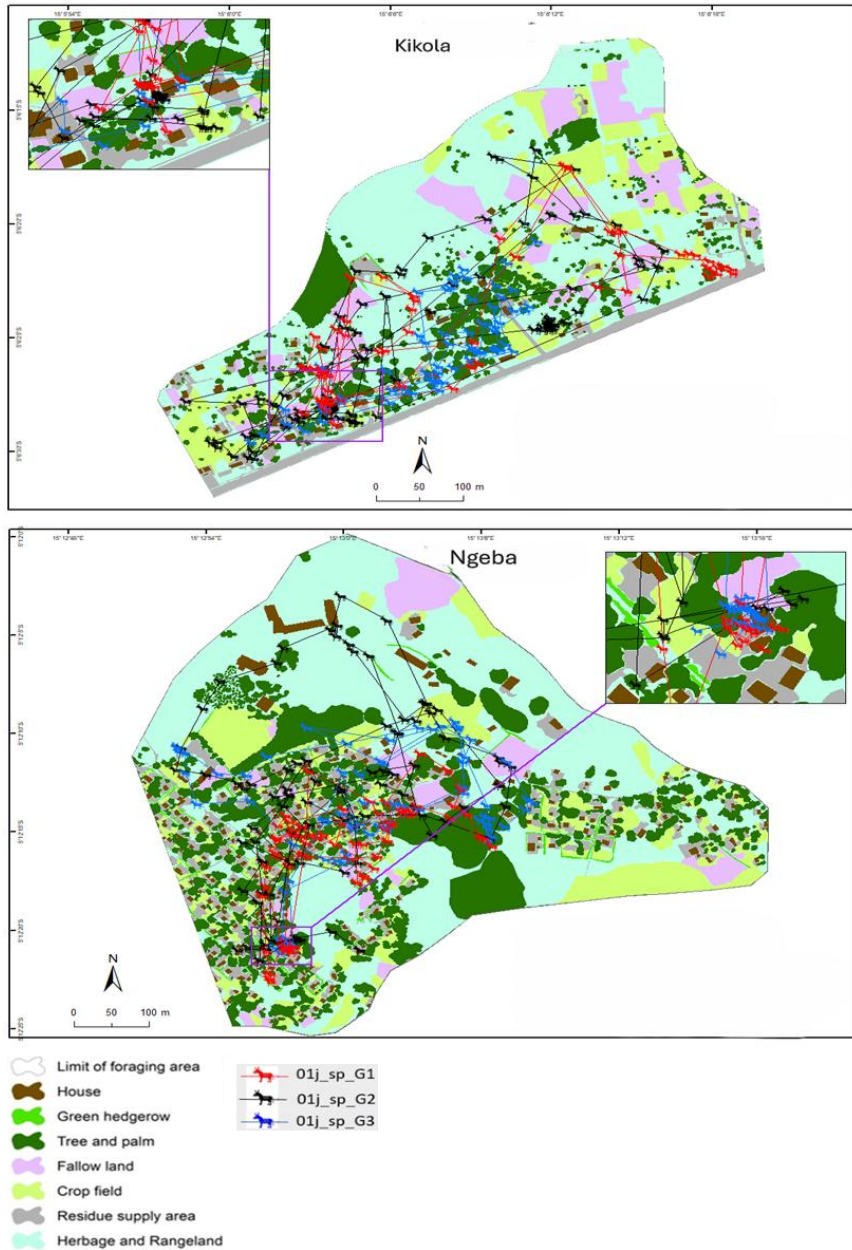


Figure 4-3 b. Land use and land cover maps illustrating the spatial configuration of compartment of foraging area (CoFA) within the agroecosystems exploited by free-ranging goats. The red, blue, and black lines exemplify georeferenced movement tracks recorded by GPS-collared goats (G1, G2, and G3) on day 1 of monitoring in rainy season at the Kikola and Ngeba sites

Table 4-1. Characterisation of CoFA and agroecosystem landscape heterogeneity metrics

Site	CoFA Class	Frequency of patch	Patch area range (m ²) (Min-Max)	Average area (m ²) ± Std	CoFA area (m ²)	Percentage (%)	CoFA Richness	Patch density (n/ha)	Shannon diversity index
Kikola	Cropland	63	3 - 4271	461.4 ± 738.2	29069	14.8	5	28	1.0705
	Fallow land	34	3 - 3222	720.6 ± 922.1	24501	12.5			
	Range land	372	5 - 86048	330.6 ± 4480	122985	62.8			
	Residue supply area	78	4 - 9687	245.7 ± 1095.9	19164	9.8			
	Green hedgerow	9	4 - 68	25 ± 19.2	225	0.1			
Masamuna	Cropland	347	4 - 519	79.5 ± 79.7	27581	8.9	5	54	1.1928
	Fallow land	58	14 - 1263	143.1 ± 172.3	8301	2.7			
	Range land	372	4 - 17486	106.7 ± 660.2	113185	36.4			
	Residue supply area	525	11 - 11083	276.6 ± 689.5	145229	46.7			
	Green hedgerow	389	2 - 435	43.3 ± 52.2	16832	5.4			
Mosango	Cropland	152	4 - 1504	126.6 ± 172	19248	6.1	5	31	0.9427
	Fallow land	50	30 - 1758	363.6 ± 374	18178	5.7			
	Range land	470	4 - 9898	469.8 ± 4634.1	220804	69.7			
	Residue supply area	212	10 - 3265	257.9 ± 328.2	54694	17.3			
	Green hedgerow	100	5 - 172	38.6 ± 34.9	3857	1.2			
Ngeba	Cropland	185	5 - 9027	257.4 ± 868.6	47613	12.7	5	24	1.0027
	Fallow land	23	61 - 6034	861.3 ± 1357.8	19809	5.3			
	Range land	298	4 - 16066	853.6 ± 9328.4	254381	67.8			
	Residue supply area	291	2 - 1631	166.2 ± 181.6	48375	12.9			
	Green hedgerow	117	4 - 234	43 ± 47.3	5030	1.3			

Goats in free-range systems consumed a total of 57 forage species, including grasses (17%, n = 10) and legumes (9%, n = 5), which were the most frequently consumed botanical groups. The remaining 74% (n = 42) of species were distributed across 31 distinct botanical families. Detailed information on life forms, plant parts consumed, seasonal consumption patterns, and nutritional profiles of these species is presented in Tables 4-2a and 4-2b for the Kongo Central and Kwilu provinces, respectively.

Table 4-2. a. Forage consumed by goats at Ngeba and Kikola sites, Kongo Central region, DRC

Category ¹	Species ²	Part consumed ³	Botanical family ⁴	Live form ⁵	Season of consumption ⁶	CP ⁷		NDF ⁸		ADF ⁹		Digestibility ¹⁰	
						(% of DM)		(% of DM)		(% of DM)		(% of DM)	
						RS	DS	RS	DS	RS	DS	RS	DS
Grass and grass-like plant	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS and DS	16.2	13.8	68.1	72.9	29.7	36.4	44.5	40.2
	<i>Cyperus esculentus</i> L.	leaves	Cyperaceae	Herbaceous	RS	25.3	-	47.4	-	26.6	-	75.6	-
	<i>Digitaria horizontalis</i> Willd.	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS	9.9	-	45.6	-	30.5	-	47.5	-
	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS and DS	19.8	14.4	61.8	68.8	28.3	32.1	57.5	49.9
	<i>Panicum maximum</i> Jacq.	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS and DS	20.8	15.6	58.5	67.1	32.4	34.1	62.4	46.1
	<i>Paspalum notatum</i> Alain ex Flügge	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS and DS	17.4	15.1	62.6	68.5	32.1	36.4	53.3	40.5
Legume	<i>Centrosema virginianum</i> (L.) Benth.	leaves	Fabaceae	Herbaceous	RS	32.1	-	39.7	-	22.6	-	70.5	-
	<i>Acacia auriculiformis</i> A. Cunn. ex Benth.	seed	Fabaceae	Tree	DS	-	27.2	-	34.3	-	25.3	-	68.2
	<i>Acacia auriculiformis</i> A. Cunn. ex Benth.	leaves	Fabaceae	Tree	RS and DS	16.9	16.3	56.5	57.9	48.7	50.1	39.4	36.5
	<i>Psophocarpus scandens</i> (Endl.) Verdc.	leaves	Fabaceae	Herbaceous	RS	39.9	-	38.7	-	17.8	-	81.2	-
	<i>Calopogonium mucunoides</i> Desv.	leaves	Fabaceae	Herbaceous	RS	30.0	-	43.2	-	26.7	-	58.2	-
Others	<i>Amaranthus blitum</i> L.	Leaves and stem	Amaranthaceae	Herbaceous	RS	32.2	-	25.8	-	13.9	-	69.7	-
	<i>Boerhavia diffusa</i> L.	leaves	Nyctaginaceae	Herbaceous	RS	30.9	-	32.9	-	18.1	-	70.5	-
	<i>Oncoba welwitschii</i> Oliv. Syn. <i>Caloncoba welwitschii</i> (Oliv.) Gilg	leaves	Salicaceae	Shrub	RS and DS	19.9	17.1	49.4	51.2	27.9	32.3	54.1	50.2
	<i>Carica papaya</i> L.	leaves	Caricaceae	Herbaceous	RS and DS	15.8	15.1	20.3	21.1	19.6	20.9	80.1	79.6
	<i>Chromolaena odorata</i> (L.) R.M. King & H. Rob.	leaves	Asteraceae	Herbaceous	RS and DS	32.0	21.4	33.6	39.9	17.1	26.9	82.3	63.1
	<i>Combretum racemosum</i> P. Beauv.	leaves	Combretaceae	Shrub	RS and DS	13.9	13.1	40.2	38.5	27.4	26.8	56.7	57.1
	<i>Commelina diffusa</i> Burm. f.	Leaves and stem	Commelinaceae	Herbaceous	RS and DS	27.5	25.1	37.5	39.1	22.9	23.4	80.2	79.4
	<i>Erigeron sumatrensis</i> Retz. Syn. <i>Conyza sumatrensis</i> (Retz.) E. Walker	leaves	Asteraceae	Herbaceous	RS and DS	20.3	16.6	32.7	35.1	28.2	29.7	53.4	51.4
	<i>Costus phyllocephalus</i> K. Schum.	leaves	Costaceae	Herbaceous	RS and DS	21.1	18.9	51.9	55.5	27.2	29.3	43.8	40.2
	<i>Croton hirtus</i> L'Hér.	Leaves and stem	Euphorbiaceae	Herbaceous	RS and DS	26.9	21.9	32.9	36.8	22.8	23.5	75.6	73.0

Category ¹	Species ²	Part consumed ³	Botanical family ⁴	Live form ⁵	Season of consumption ⁶	CP ⁷ (% of DM)		NDF ⁸ (% of DM)		ADF ⁹ (% of DM)		Digestibility ¹⁰ (% of DM)	
						RS	DS	RS	DS	RS	DS	RS	DS
	Cyathula prostrata (L.) Blume	Leaves and stem	Amaranthaceae	Herbaceous	RS and DS	24.4	24.7	37.7	36.5	15.7	18.9	62.7	54.8
	Dacryodes edulis (G. Don) H.J. Lam	leaves	Burseraceae	Tree	RS and DS	11.3	9.8	43.7	46.5	35.8	37.1	40.5	39.6
	Elaeis guineensis Jacq.	leaves	Areaceae	Herbaceous	RS and DS	19.8	17.9	59.4	61.9	33.3	35.7	52.5	49.3
	Euphorbia hirta L.	Leaves and stem	Euphorbiaceae	Herbaceous	RS	14.2	-	19.9	-	17.0	-	33	-
	Ficus bubu Warb.	leaves	Moraceae	Shrub	RS and DS	17.8	14.5	37.4	39.1	24.5	27.4	64.2	59.1
	Gymnanthemum coloratum (Willd.) H. Rob. & B. Kahn	leaves	Asteraceae	Shrub	DS	-	30.1	-	26.5	-	21.2	-	70.7
	Hymenocardia ulmoides Oliv.	leaves and twig	Phyllanthaceae	Shrub	RS and DS	29.9	25.7	48.6	50.5	31.6	35.3	68.7	65.2
	Phragmanthera usuiensis (Oliv.) M.G. Gilbert subsp. Usuiensis Syn. Loranthus albizziae De Wild.	leaves	Loranthaceae	Shrub	RS and DS	11.6	11.9	38.2	37.8	31.6	34.9	52.5	51.3
	Mangifera indica L.	leaves	Anacardiaceae	Tree	RS and DS	9.3	10	43.7	45.0	33.5	32.7	54.5	54.1
	Manihot esculenta Crantz Syn. Manihot utilissima Pohl	tuber	Euphorbiaceae	Shrub	RS and DS	1.1	0.9	1.1	1.1	0.7	0.6	99.1	98.9
	Manihot esculenta Crantz Syn. Manihot utilissima Pohl	leaves	Euphorbiaceae	Shrub	RS and DS	30.5	28.9	33.5	34.1	17.3	18.1	76.7	77.1
	Manihot esculenta Crantz Syn. Manihot utilissima Pohl	tuber peels	Euphorbiaceae	Shrub	RS and DS	5.8	6.1	20.8	21.6	17.2	17.5	73.6	74.2
	Megaphrynium macrostachyum (Benth.) Milne-Redh.	leaves	Marantaceae	Herbaceous	RS and DS	14.7	16.6	66.4	63.8	37.9	36.6	32.3	33.8
	Morinda morindoides (Baker) Milne-Redh.	leaves	Rubiaceae	Shrub	RS and DS	24.4	24.9	49.2	50.5	40.6	39.9	56.1	55.4
	Musa acuminata Colla	leaves	Musaceae	Herbaceous	RS and DS	13.6	14.1	47.5	50.1	27.1	26.4	45.1	45.5
	Passiflora edulis Sims	Leaves and stem	Passifloraceae	Herbaceous	RS and DS	35.3	28.9	22.5	27.4	17.9	18.7	91.3	85.9
	Persea americana Mill.	leaves	Lauraceae	Tree	RS and DS	12.1	11.8	44.3	45.6	35.3	33.9	36.5	38.3
	Psidium guajava L.	leaves	Myrtaceae	Tree	RS and DS	13.4	12.9	44.8	46.3	34.3	35.1	37.2	35.6
	Rhabdophyllum arnoldianum (De Wild. & T. Durand) Tiegh.	leaves	Ochnaceae	Shrub	RS and DS	9.1	9.8	44.3	45.1	28.3	29.6	40.1	39.7
	Sida acuta Burm. f.	Leaves and stem	Malvaceae	Herbaceous	RS and DS	29.2	22.3	36.1	41.7	19.2	23.3	87.2	79.1
	Smilax anceps Willd.	Leaves	Smilacaceae	Herbaceous	RS and DS	12.3	13.9	52.5	50.1	37.3	36.5	38.7	41.5
	Urena lobata L.	Leaves and stem	Malvaceae	Herbaceous	RS and DS	19.4	18.8	44.9	45.7	29.9	31.1	50.5	49.7
	Tithonia diversifolia (Hemsl.) A. Gray	Leaves	Asteraceae	Shrub	DS	-	22.9	-	33.4	-	27.2	-	58.6

Table 4-3. b. Forage consumed by goats at Masamuna and Mosango sites, Kwilu region, DRC

Category ¹	Species ²	Part consumed ³	Botanical family ⁴	Live form ⁵	Season of consumption ⁶	CP ⁷		NDF ⁸		ADF ⁹		Digestibility ¹⁰	
						(% of DM)		(% of DM)		(% of DM)		(% of DM)	
						RS	DS	RS	DS	RS	DS	RS	DS
Grass and grass-like plant	<i>Anthephora cristata</i> (Döll) Hack. ex De Wild. & T.Durand	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS	19.9	-	45.5	-	26.6	-	65.2	-
	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS and DS	16.7	8.1	63.9	77.2	30.8	35.5	49.1	29.3
	<i>Cyperus esculentus</i> L.	leaves	Cyperaceae	Herbaceous	RS and DS	16.3	16.1	62.1	63.6	31.8	33.7	46.2	43.8
	<i>Digitaria horizontalis</i> Willd.	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS	9.9	-	44.5	-	31.5	-	47.1	-
	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS and DS	18.2	13.6	55.6	61.7	30.2	32.5	62.6	43.8
	<i>Hyparrhenia diplandra</i>	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS and DS	8.1	15.0	66.7	57.1	38.4	25.9	33.5	46.7
	<i>Panicum maximum</i> Jacq.	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS and DS	16.5	15.7	64.7	67.5	36.4	39.1	50.3	44.1
	<i>Paspalum notatum</i> Alain ex Flügge	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS and DS	15.8	11.1	55.7	60.1	31.7	33.3	55.1	49.3
	<i>Pennisetum setaceum</i>	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS	13.9	-	57.7	-	38.2	-	65.2	-
	<i>Phyllostachys viridiglaucescens</i>	leaves	Poaceae	Herbaceous	RS and DS	27.9	22.3	58.1	65.9	28.3	32.7	55.9	47.5
Legume	<i>Calopogonium mucunoides</i> Desv.	leaves	Fabaceae	Herbaceous	RS	30.1	-	30.7	-	24.3	-	58.8	-
	<i>Psophocarpus scandens</i> (Endl.) Verdc.	leaves	Fabaceae	Herbaceous	RS	31.1	-	49.7	-	30.9	-	55.1	-
	<i>Zornia latifolia</i>	Leaves and stem	Fabaceae	Herbaceous	RS	25.3	-	32.1	-	26.9	-	72.1	-
Others	<i>Aframomum albioviaceum</i> (Ridl.) K.Schum.	leaves	Zingiberaceae	Herbaceous	RS and DS	19.8	17.1	58.7	62.1	32.3	32.9	30.4	28.2
	<i>Amaranthus blitum</i> L.	Leaves and stem	Amaranthaceae	Herbaceous	RS	32.2	-	25.8	-	13.9	-	69.6	-
	<i>Asystasia gangetica</i>	Leaves and stem	Acanthaceae	Herbaceous	RS and DS	19.9	14.9	15.4	36.0	12.1	30.1	51.6	27.8
	<i>Boerhavia diffusa</i> L.	leaves	Nyctaginaceae	Herbaceous	RS	23.4	-	27.1	-	17.2	-	70.0	-
	<i>Breynia disticha</i> J.R.Forst. & G.Forst.	leaves and twig	Phyllanthaceae	Shrub	RS and DS	24.7	23.2	31.7	33.3	18.6	20.4	77.9	70.1
	<i>Carica papaya</i> L.	leaves	Caricaceae	Herbaceous	RS and DS	21.0	20	24.3	25.7	19.9	20.6	74.2	69.7
	<i>Chromolaena odorata</i> (L.) R.M. King & H. Rob.	leaves	Asteraceae	Herbaceous	RS and DS	27.6	24.6	35.8	39.8	33.9	35.8	53.5	52.8
	<i>Commelina diffusa</i> Burm. f.	Leaves and stem	Commelinaceae	Herbaceous	RS and DS	22.3	19.1	31.6	35.8	23.7	24.5	62.3	55.1
	<i>Croton hirtus</i> L'Hér.	Leaves and stem	Euphorbiaceae	Herbaceous	RS and DS	19.8	13.4	30.8	37.9	12.6	30.1	54.1	27.3
	<i>Cyathula prostrata</i> (L.) Blume	Leaves and stem	Amaranthaceae	Herbaceous	RS and DS	19.7	18.8	32.6	30.6	16.2	17.1	47.4	46.7
	<i>Dacryodes edulis</i> (G. Don) H.J. Lam	leaves	Burseraceae	Tree	RS and DS	10.9	9.8	41.2	44.5	36.3	37.6	41.3	40.9
	<i>Dracaena fragrans</i> (L.) Ker Gawl.	leaves	Asparagaceae	Herbaceous	RS and DS	19.8	20.1	44.1	43.4	32.3	33.7	55.7	51.2
	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	leaves	Areaceae	Herbaceous	RS and DS	16.5	13.2	56.4	64.7	34.8	37.2	45.3	39.1
	<i>Euphorbia hirta</i> L.	Leaves and stem	Euphorbiaceae	Herbaceous	RS	13.6	-	17.1	-	14.4	-	32.9	-
	<i>Ficus bubu</i> Warb.	leaves	Moraceae	Shrub	RS and DS	18.2	15.1	49.9	56.4	40.1	43.5	54.1	46.3

Category ¹	Species ²	Part consumed ³	Botanical family ⁴	Live form ⁵	Season of consumption ⁶	CP ⁷ (% of DM)		NDF ⁸ (% of DM)		ADF ⁹ (% of DM)		Digestibility ¹⁰ (% of DM)	
						RS	DS	RS	DS	RS	DS	RS	DS
	Gymnanthemum coloratum (Willd.) H. Rob. & B. Kahn	leaves	Asteraceae	Shrub	DS and DS	29.5	20.2	24.5	31.9	20.7	24.9	71.6	59.4
	Hymenocardia acida Tul.	leaves and twig	Phyllanthaceae	Shrub	RS and DS	21.8	22.9	70.1	64.5	64.8	55.3	21.1	26.3
	Ipomoea batatas (L.) Lam.	leaves and twig	Convolvulaceae	Herbaceous	RS and DS	25.2	20.1	24.2	30.1	21.5	23.6	74.0	68
	Phragmanthera usuiensis (Oliv.) M.G. Gilbert subsp. Usuiensis Syn. Loranthus albizziae De Wild.	leaves	Loranthaceae	Shrub	RS and DS	10.9	10.5	55.1	53.9	49.6	51.1	34.3	32.1
	Mangifera indica L.	leaves	Anacardiaceae	Tree	RS and DS	11.3	10.1	42.1	42.9	30.9	40.2	57.1	54.6
	Manihot esculenta Crantz Syn. Manihot utilissima Pohl	tuber	Euphorbiaceae	Shrub	RS and DS	0.8	1	1.7	1.9	1.5	1.5	97.9	98.7
	Manihot esculenta Crantz Syn. Manihot utilissima Pohl	leaves	Euphorbiaceae	Shrub	RS and DS	32.2	29.4	34.3	37.7	28.1	31.2	68.9	68.4
	Manihot esculenta Crantz Syn. Manihot utilissima Pohl	tuber peels	Euphorbiaceae	Shrub	RS and DS	9.5	8.7	21.7	20.9	18.2	19.1	51.4	47.1
	Megaphrynium macrostachyum (Benth.) Milne-Redh.	leaves	Marantaceae	Herbaceous	RS and DS	15.3	13.1	69.3	65.1	44.2	41.8	22.1	24.5
	Musa acuminata Colla	leaves	Musaceae	Herbaceous	RS and DS	16.6	17.3	61.3	60.7	34.4	33.8	31.5	30.2
	Parinari capensis Harv.	leaves	Chrysobalanaceae	Shrub	RS and DS	9.5	11.1	71.9	69.4	64.7	60.8	15.4	18.8
	Passiflora edulis Sims	Leaves and stem	Passifloraceae	Herbaceous	RS and DS	41.3	40.5	20.8	21.5	18.5	19.9	86.6	81.3
	Persea americana Mill.	leaves	Lauraceae	Tree	RS and DS	12.2	11.9	42.1	40.4	32.6	31.9	41.2	42.5
	Rumex usambarensis	Leaves and stem	Polygonaceae	Herbaceous	RS and DS	27.1	29.4	31.5	30.9	20.2	20.7	75.4	72.8
	Sida acuta Burm. f.	Leaves and stem	Malvaceae	Herbaceous	RS and DS	26.5	23.7	22.4	34.0	18.1	17.1	74.3	76.2
	Spermacoce latifolia Aubl.	Leaves	Rubiaceae	Herbaceous	RS	20.9	-	23.6	-	18.9	-	73.1	-
	Urena lobata L.	Leaves and stem	Malvaceae	Herbaceous	RS and DS	22.2	13.9	33.4	40.1	28.8	31.5	65.4	40.5
	Talinum triangulare (Jacq.) Willd.	Leaves and stem	Talinaceae	Herbaceous	RS and DS	16.4	14.1	21.9	35.4	13.3	17.7	52.4	45.1
	Tithonia diversifolia (Hemsl.) A. Gray	Leaves	Asteraceae	Shrub	DS	-	25.4	-	34.5	-	33.2	-	58.6

¹Category denotes the primary taxonomic classification of the consumed forage species within plant community hierarchies.

²Species specifies the binomial nomenclature (genus and species) of the taxonomically identified forage consumed.

³Plant part consumed indicates the specific anatomical structure of the forage ingested.

⁴Botanical family classifies the consumed forage species according to its taxonomic family

⁵Live form describes the physiognomy of the consumed forage

⁶Season of consumption is the period of forage utilisation, defined as dry season (DS), rainy season (RS), or both (RS and DS).

⁷CP is the crude protein content expressed as grams per 100 grams of dry matter (g/100 g DM).

⁸NDF (neutral detergent fibre) measures hemicellulose, cellulose, and lignin content, reported as grams per 100 grams of dry matter (g/100 g DM).

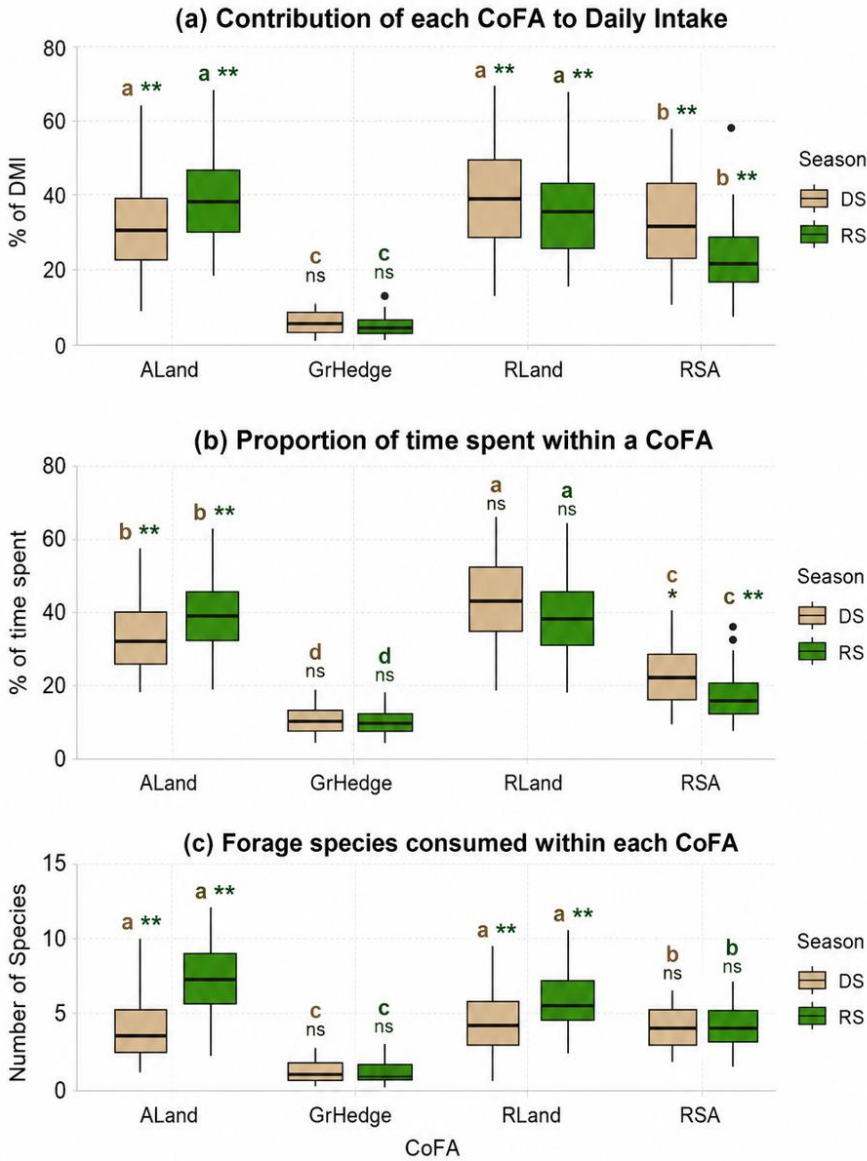
⁹ADF (acid detergent fibre): measures cellulose and lignin content reported as grams per 100 grams of dry matter (g/100 g DM).

¹⁰Digestibility represents the proportion of dry matter digested (DMD) (g/100 g DM ingested).

Table 4-4. Goat's daily diet quantity and quality across seasons and sites

		Dry mater intake (g DMI.kg⁻¹ LW⁻¹)	Number species consumed	CP (% of DM)	ADF (% of DM)	NDF (% of DM)	Digestibility (% of DM)
Kikola	Rainy season daily diet	22.1±2.6	12±3	20.1±1.4	24.2±1.9	42.1±2.9	66.1±2.5
	Dry season daily diet	20.4±1.6	9±1	17.8±2.6	24.6±1.5	43.3±2.1	63.9±3.1
Ngeba	Rainy season daily diet	23.9±1.7	13±3	20.2±1.6	22.8±1.8	40.4±3	66.1±3.3
	Dry season daily diet	20.6±2.3	13±1	18.0±1.4	24.3±1.9	42.4±5.3	64.7±3.2
Masamuna	Rainy season daily diet	25.2±1.3	22±2	19.3±1.4	27.1±1.3	39.6±2.6	56.8±2.4
	Dry season daily diet	21.7±1.7	15±2	16.9±1.2	32.9±2.4	46.5±5.3	52.9±3.8
Mosango	Rainy season daily diet	25.4±1.5	22±3	18.9±0.9	28.7±1.4	42.9±1.5	53.9±2.4
	Dry season daily diet	21.1±1.5	20±2	18.4±1.3	28.9±1.2	43.6±2.5	55.3±3.2
	Site	0.0018	< 0.001	0.205	< 0.001	0.347	< 0.001
P-value	Season	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.062	0.067	0.0016
	Site x Season	0.1899	< 0.001	0.245	< 0.001	0.005	0.4339

Goat diet composition varied across sites and seasons (Table 4-3). DMI, forage species diversity, and diet digestibility all showed significant effects of site and season ($p < 0.05$). By contrast, NDF content did not differ significantly between sites or seasons ($p > 0.05$), while ADF exhibited spatial but not seasonal variation ($p > 0.05$).



Different letters indicate significant differences among CoFA according to Tukey's post-hoc test ($p < 0.05$).

Identical letters indicate no significant difference among CoFA.

Asterisks indicate significant seasonal differences within a CoFA (** $p < 0.01$; * $p < 0.05$), whereas ns indicates no significant seasonal effect.

Figure 4-4. The importance of each compartment of foraging area (ALand: agricultural land including crop and fallow land; GrHedge: living green hedgerow used as plot boundary or crop field protection; RLand: rangeland comprising savanna and/or natural herbage) in terms of their contribution to daily dry matter intake (a), proportion of time goat spent on each one (b) and number of different forage species consumed (c), during the rainy (RS) and dry (DS) season

Goat diets were more species-diverse and contained higher DMI and CP content during the rainy season than during the dry season across all sites ($p < 0.05$). Across sites (Table 4 3), Masamuna and Mosango showed the greatest species diversity in the goats' daily diets ($p < 0.05$), although CP content did not differ significantly among sites ($p > 0.05$).

The contribution of each CoFA to daily DMI, forage species richness, and time spent foraging (Fig. 4-3) differed significantly among CoFA ($p < 0.01$). Within a given CoFA, species richness varied significantly between seasons ($p < 0.01$) within ALand and RLand, whereas DMI, species richness and grazing time were more stable within GrHedge. Tukey's post-hoc test indicated that ALand and Rland contributed the highest proportion of daily DMI. The contribution of ALand to DMI during the rainy season was $38\% \pm 9\%$, but declined in the dry season ($28\% \pm 10\%$).

The RLand contribution increased from $34\% \pm 10\%$ in the rainy season to $36\% \pm 13\%$ in the dry season. Residue supply areas became more important in the dry season ($31\% \pm 12\%$) than in the rainy season ($23\% \pm 9\%$), while green hedgerows contributed minimally in both seasons ($5\% \pm 3\%$ in the rainy season and $6\% \pm 3\%$ in the dry season).

The number of forage species consumed within each CoFA was found to be significantly higher during the rainy season. However, the RSA and GrHedge exhibited greater stability in terms of the forage species consumed. The most species-rich compartments were ALand and RLand. ALand exhibited 8 ± 3 forage species in the rainy season and 5 ± 2 in the dry season, while RLand exhibited 7 ± 2 and 5 ± 2 respectively in the rainy and dry seasons, compared with residue supply areas (5 ± 2 in both seasons) and green hedgerows (2 ± 1 in both seasons). In terms of grazing time allocation, goats spent most of their time in rangelands ($38\% \pm 14\%$ in the rainy season and $41\% \pm 12\%$ in the dry season) and agricultural land ($38\% \pm 10\%$ in the rainy season and $29\% \pm 7\%$ in the dry season), considerably less time was spent in the other compartments.

4.4. Discussion

In free-range goat farming, little is known about how agroecosystem landscapes are structured and how they contribute to goats' daily diets. This study was conducted under typical traditional free-range goat farming conditions, characterised by small herd sizes (<15 goats) composed mainly of females and unweaned kids (Wasso et al., 2018; Airs et al., 2023; Alexandre et al., 2012; Namonje-Kapembwa et al., 2022; Seleka et al., 2024; Tchouamo et al., 2005).

Adult males and growing young goats were not included because they are generally sold or consumed early. The limited sample size (12 female goats monitored for 3 days across 4 sites) constrains the generalisation of the findings to the wider goat population, given natural variability in grazing behaviour and nutritional requirements.

Despite these limitations, the combined use of GPS tracking, drone-based mapping, and direct observation provided valuable insights into smallholder free-range goat farming. This integrated approach linked goat movement patterns to the structural heterogeneity of agroecosystems, providing more accurate insights into compartment use and forage availability than traditional monitoring methods.

Agricultural lands (cropped fields and fallows) and rangelands emerged as the main compartments of the agroecosystem exploited by goats (Fig. 4-3). Their higher forage diversity and richness likely attracted goats, reflecting the animals' selective foraging behaviour and strategies to meet daily nutritional needs. Residue supply areas and hedgerows contributed less overall but still served as supplementary forage sources. The UAS-based maps and GPS tracks align with earlier findings from the DRC (Wasso et al., 2019; Ndonga et al., 2024), which highlighted the importance of rangelands and crop residues as feed resources for extensive goat farming systems.

The drone-based maps revealed strong structural heterogeneity within the agroecosystems, with 24–54 CoFA patches per hectare, indicating high landscape fragmentation (Table 4-1) driven by anthropogenic activities (Molinario et al., 2017). Land use consisted of small crop plots, scattered farm structures, and livestock shelters interspersed with natural savannah. This fragmentation explains the high landscape diversity indices (0.94–1.19) and species richness observed, with goats consuming 57 different forage species (Tables 4-2a, 4-2b).

The plant diversity included both cultivated species (in croplands and hedgerows) and a predominance of spontaneous grasses and legumes (in rangelands and fallows), together contributing to a diverse forage base. The Aw4 Köppen climate subtype, characterised by an 8- to 9-month rainy season and high temperatures (Lohmann et al., 1993), favours and explains this floristic richness. Similar associations between rainfall, temperature, plant diversity, and biomass productivity have been reported in Venezuelan tropical ecosystems (Marín et al., 2001).

Savannah-type rangelands dominated the agroecosystem landscape, covering 36%–70% of the total area (Table 4-1). Their extensive coverage reflects the low population density in rural areas of the DRC, driven largely by rural–urban migration (Loola, 2025), rather than by deliberate land-use management strategies. Such rangeland availability underpins extensive livestock farming systems, as

shown in earlier studies (Augustine et al., 2003; Zampaligré et al., 2013; Boval et al., 2017; Ouédraogo et al., 2021).

GPS tracking data also confirmed the functional importance of rangelands and croplands, where goats spent most of their time and obtained the highest proportion of their daily DMI. These CoFA likely play a significant role in nutrient recycling, with nutrients returned directly via goat excreta during foraging or indirectly through manure collected from night corrals and later applied to croplands (Audouin et al., 2024).

Although nutrient fluxes within these compartments were not directly quantified, this assumption of recycling is realistic. Schlecht et al. (2006) demonstrated that excreta deposition by free-ranging herbivores is proportional to the time spent in specific areas. Thus, prolonged goat presence in agricultural land, rangelands, and night corrals likely contributes to nutrient transfer through faeces and urine, supporting ICLS by enhancing soil fertility and reducing dependence on external inputs.

Green hedgerows, though marginal contributors to DMI, showed potential as valuable supplementary forage sources. Their contribution could be enhanced by enrichment with high-fodder-value perennials such as *Leucaena*, *Albizia*, *Gliricidia*, *Acacia* trees, and vetiver or elephant grasses. These species, known for their high productivity and year-round palatability, could increase both forage diversity and the DMI contribution from hedgerows.

This finding aligns with Zampaligré et al. (2013) and Ouédraogo et al. (2021), who emphasised the agroecological importance of woody perennials in alleviating dry-season forage shortages. A greater availability of woody forages may also help improve the relatively low daily DMI observed in this study (20–25 g DM kg⁻¹ live weight [LW] across seasons) (Table 4-3).

These values are close to the minimum requirement (19 g kg⁻¹ LW) but remain below the average (30 g kg⁻¹ LW) and maximum (41 g kg⁻¹ LW) reported under similar subtropical conditions in Brazil (Almeida et al., 2019). Increasing DMI through hedgerow forage supply could also allow for longer goat confinement, facilitating manure collection and enhancing nutrient recycling into croplands.

Moreover, hedgerows restrict goat access to croplands, thereby helping to reduce crop damage and mitigate farmer–herder conflicts—an ongoing challenge in African agro-pastoral systems (Barrière & Barrière, 2002; Azalou et al., 2023).

Because forage nutritional value is a key determinant of diet quality and, consequently, of the nutrient composition of excreta (Rufino et al., 2006; Piñeiro-

Vázquez et al., 2017; Wang et al., 2018), the goats' daily diet also varied according to the nutritional value of the forage species (Tables 5a, 5b), the phenological stage of the consumed plant parts, the season, and the site. For instance, *Manihot esculenta* showed pronounced contrasts in CP content between tubers (approximately 1% CP), peelings (6.0%–9.5% CP), and leaves (approximately 30% CP).

Legumes consistently exhibited the highest CP content (25%–40% CP), attributable to symbiotic nitrogen fixation (Prell & Poole, 2006; Barbieri et al., 2023). As ruminants use nitrogen inefficiently, excess intake of protein-rich legumes leads to nitrogen-rich excreta. Both unassimilated dietary protein and nitrogen released by ruminal microbiota are largely excreted as urinary urea (Rotz et al., 2006; Nasiru et al., 2014).

Surprisingly, several non-leguminous species (*Passiflora* spp., *Amaranthus blitum*, *Chromolaena odorata*, *Hymenocardia ulmoides*, *Gymnanthemum coloratum*, and *Boerhavia diffusa*) also exhibited high CP contents ($\geq 30\%$), likely due to the presence of non-protein nitrogen in immature leaves with low C/N ratios (Lu et al., 2005; Zeng & Chen, 2018; Baath et al., 2024). The goats' selective feeding behaviour (Lee et al., 2019; Dias-e-Silva & Abdalla Filho, 2020) favoured tender, nutrient-rich foliage, though they also consumed fibrous, mature plants (NDF/ADF > 30%, digestibility < 70%). This mixed foraging strategy helps balance rumen microbiome function and nutrient intake, consistent with findings from other studies on ruminant feeding behaviour (Fedele et al., 1993; Lu et al., 2005; Zampaligré et al., 2013; Claps et al., 2020).

The high CP values observed in grasses (Tables 4-2a, 4-2b) were comparable to those reported for fertilised pastures at early growth stages (Hirata et al., 2016; Muntifering et al., 2000; Matta et al., 2023; F. D. Fernandes et al., 2014; Paciullo et al., 2017; Pedreira et al., 2024; Sokupa et al., 2024), possibly reflecting soil fertility and post-fire regrowth effects (McNew et al., 2023), which promote young, protein-rich shoots often preferred by grazers (Augustine et al., 2003).

Conversely, lower CP values reported in other studies (Foster et al., 2011; Hare et al., 2015; Alsunaydi et al., 2024) may result from differences in climate, soil, or sampling protocols, as those studies often collected mature forages (>30 days post-emergence) with higher lignin content (Zeng & Chen, 2018; Baath et al., 2024).

Even under similar geo-climatic conditions, seasonal patterns in forage quality were evident. CP content and digestibility peaked during the rainy season, while NDF and ADF increased in the dry season due to rapid lignification under water stress and rising C/N ratios, as noted by Ephrem et al. (2015). These seasonal shifts negatively affected forage quality and, consequently, the goats' daily diets during the dry season.

Although CP contents were generally high (Tables 4-2a, 4-2b), they do not necessarily reflect protein bioavailability or digestibility because of the presence of antinutritional compounds such as alkaloids and tannins (Alavarse et al., 2022), which bind dietary proteins and inhibit enzymatic hydrolysis and subsequent nutrient assimilation (Ebrahimi et al., 2009; Sá et al., 2020). Moreover, non-protein nitrogen compounds—commonly found in immature or rapidly growing vegetative tissues—differ from those in other plant parts and may artificially inflate CP estimates without increasing the availability of usable amino acids.

The proportion of plant parts consumed reflects individual differences in goats' selective grazing behaviour. Such selectivity directly shapes daily diet composition and, consequently, the nutrient profile of excreta (Rufino et al., 2006; Piñeiro-Vázquez et al., 2017; Wang et al., 2018). However, this study did not quantify the proportion of plant parts within total DMI.

Combined with the small sample size (three goats per site) and short monitoring period (3-days across four sites), this limits the extent to which the findings can be generalised. In addition, the nutrient recycling potential within agroecosystems was inferred rather than directly measured through excreta collection and analysis, which introduces uncertainty due to individual variability in grazing behaviour and potential nutrient losses.

Despite these limitations, the integration of GPS tracking, direct observation, and drone mapping provided valuable insights into the spatial dynamics of free-ranging goats and their foraging patterns across agroecosystem compartments. Even with the availability of forage in rangelands, free-ranging goats obtained a substantial portion of their daily DMI from croplands. This dependence increases competition between livestock and humans for food resources and exacerbates farmer–herder conflicts.

Future research should expand the sample size to include other goat groups (e.g., adult males and young goats), extend the monitoring duration, and quantify both the proportions of plant parts consumed and the nutrient composition of excreta. Such work would offer a more comprehensive understanding of free-ranging goat diets and their potential contribution to nutrient recycling within ICLS.

4.5. Conclusions

This study examined the structure of agroecosystem landscapes and their contribution to the daily diets of free-ranging goats. The results show that, in smallholder farming systems of western DRC, free-ranging goats exploit multiple agroecosystem compartments and consume a diverse range of 57 forage species of

varying nutritional quality, without relying on external feed inputs. Among the exploited compartments, agricultural lands and rangelands contributed most to daily DMI and forage diversity.

Although green hedgerows contributed little to the goats' daily diets, their role could be strengthened through enrichment with high-value forage species, such as woody and perennial grass fodders. Doing so could provide a dual benefit: reducing goat intrusion into croplands while supplying substantial forage biomass year-round.

The spatial heterogeneity of agroecosystem compartments, combined with their floristic diversity and variable nutritional quality, supports their role as key forage sources for free-ranging goats in western DRC.

These findings, however, should be interpreted with caution. The small sample size, limited representativeness of goat populations, and short observation period may have introduced uncertainties. Nonetheless, direct observations combined with GPS tracking and drone mapping have yielded valuable insights into smallholder free-range goat farming systems.

Future research should therefore involve larger and more diverse goat populations, extended monitoring periods, and a broader range of agroecosystem contexts. Such investigations would provide stronger evidence on the compartments exploited, forage diversity, and the nutritional quality of goats' daily diets. These parameters are critical for understanding free-ranging goat dynamics and their potential role in nutrient recycling, which is essential for designing appropriate ICLS. Advancing knowledge of nutrient fluxes within agroecosystem compartments will be key to developing sustainable ICLS tailored to the diverse farming systems of SSA.

Acknowledgements

We acknowledge the financial support of ARES-CCD (Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur, Comité de Coopération au Développement du Royaume de Belgique) and the local facilitation of CAVTK (Centre Agronomique et Vétérinaire Tropical de Kinshasa). We thank the collaborating goat farmers for their participation and Mrs. Sylvie Mabilie for her technical support in forage sample analyses at the Precision Livestock and Nutrition Lab, Gembloux Agro-BioTech/ULiège.

Declarations of interest: none

Data availability : Data will be made available on request

4.6. References

- Agreil, C., & Meuret, M. (2004). An improved method for quantifying intake rate and ingestive behaviour of ruminants in diverse and variable habitats using direct observation. *Small Ruminant Research*, 54(1-2), 99-113. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2003.10.013>
- Alavarse, A. C., Frachini, E. C. G., Da Silva, R. L. C. G., Lima, V. H., Shavandi, A., & Petri, D. F. S. (2022). Crosslinkers for polysaccharides and proteins: Synthesis conditions, mechanisms, and crosslinking efficiency, a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 202, 558-596. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.029>
- Albuquerque, U. P., & Hurrell, J. A. (2016). Ethnobotany: One concept and many interpretations. In *Recent Developments and Case Studies in Ethnobotany* (Nupeea, p. 87-99). Nupeea.
- Almeida, A. K. D., Tedeschi, L. O., De Resende, K. T., Biagioli, B., Cannas, A., & Teixeira, I. A. M. D. A. (2019). Prediction of voluntary dry matter intake in stall fed growing goats. *Livestock Science*, 219, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.11.002>
- Alexandre, G., Arquet, R., Fleury, J., Troupé, W., Boval, M., Archimède, H., Mahieu, M., & Mandonnet, N. (2012). Systèmes d'élevage caprins en zone tropicale: Analyse des fonctions et des performances. *INRAE Productions Animales*, 25(3), 305-316. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2012.25.3.3218>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). Agroecology: Challenges and opportunities for farming in the Anthropocene. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 47(3), 204-215. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v47i3.2281>
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Dinelli, G., & Negri, L. (2024). Towards an agroecological approach to crop health: Reducing pest incidence through synergies between plant diversity and soil microbial ecology. *Npj Sustainable Agriculture*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.1038/s44264-024-00016-2>
- Andre Mataveia, G., Visser, C., & Siteo, A. (2023). Smallholder Goat Production in Southern Africa: A Review. In S. Kukovics (Éd.), *Goat Science—Environment, Health and Economy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97792>

- Audouin, E., Odru, M., Masse, D., Dorégo, G. S., Delaunay, V., Lecomte, P., & Vayssières, J. (2024). A methodology based on territorial metabolism analysis to assess the multi-criteria sustainability of African village terroirs with contrasted crop-livestock systems. *Agricultural Systems*, 213, 103781. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103781>
- Aufrere, J. (1982). Etude de la prévision de la digestibilité des fourrages par une méthode enzymatique. *Annales de Zootechnie*, 31(2), 111-130. <https://doi.org/10.1051/animres:19820202>
- Augustine, D. J., McNaughton, S. J., & Frank, D. A. (2003). Feedbacks between soil nutrients and large herbivores in a managed savanna ecosystem. *Ecological Applications*, 13(5), 1325-1337. <https://doi.org/10.1890/02-5283>
- Ayantunde, A. A., Briejer, M., Hiernaux, P., Udo, H. M. J., & Tabo, R. (2008). Botanical Knowledge and its Differentiation by Age, Gender and Ethnicity in Southwestern Niger. *Human Ecology*, 36(6), 881-889. <https://doi.org/10.1007/s10745-008-9200-7>
- Azalou, M., Assani, S. A., Assogba, B. G. C., Idrissou, Y., Alabi, C. D., Yabi, J. A., & Alkoiret, T. I. (2023). Dynamics of transhumant livestock systems in West African coastal countries: A review. *Journal of Livestock Science*, 14(2). <https://doi.org/10.33259/JLivestSci.2023.109-121>
- Baath, G. S., Sarkar, S., Sapkota, B. R., Flynn, K. C., Northup, B. K., & Gowda, P. H. (2024). Forage yield and nutritive value of summer legumes as affected by row spacing and harvest timing. *Farming System*, 2(1), 100069. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100069>
- Barbieri, P., Starck, T., Voisin, A.-S., & Nesme, T. (2023). Biological nitrogen fixation of legumes crops under organic farming as driven by cropping management: A review. *Agricultural Systems*, 205, 103579. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103579>
- Barnosky, A. D., Hadly, E. A., Bascompte, J., Berlow, E. L., Brown, J. H., Fortelius, M., Getz, W. M., Harte, J., Hastings, A., Marquet, P. A., Martinez, N. D., Mooers, A., Roopnarine, P., Vermeij, G., Williams, J. W., Gillespie, R., Kitzes, J., Marshall, C., Matzke, N., ... Smith, A. B. (2012). Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature*, 486(7401), 52-58. <https://doi.org/10.1038/nature11018>
- Barrière, O., & Barrière, C. (2002). *Un droit à inventer: Foncier et environnement dans le delta intérieur du Niger*. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.14471>

- Barroso, F. G., Alados, C. L., & Boza, J. (1995). Food selection by domestic goats in Mediterranean arid shrublands. *Journal of Arid Environments*, 31(2), 205-217. <https://doi.org/10.1006/jare.1995.0061>
- Barroso, F. G., Alados, C. L., & Boza, J. (2000). Social hierarchy in the domestic goat: Effect on food habits and production. *Applied Animal Behaviour Science*, 69(1), 35-53. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(00\)00113-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(00)00113-1)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>
- Bonnet, O., Hagenah, N., Hebbelmann, L., Meuret, M., & Shrader, A. M. (2011). Is Hand Plucking an Accurate Method of Estimating Bite Mass and Instantaneous Intake of Grazing Herbivores? *Rangeland Ecology & Management*, 64(4), 366-374. <https://doi.org/10.2111/REM-D-10-00186.1>
- Bonnet, O. J. F., Meuret, M., Tischler, M. R., Cezimbra, I. M., Azambuja, J. C. R., & Carvalho, P. C. F. (2015). Continuous bite monitoring: A method to assess the foraging dynamics of herbivores in natural grazing conditions. *Animal Production Science*, 55(3), 339. <https://doi.org/10.1071/AN14540>
- Bourban, M. (2019). Croissance démographique et changement climatique: Repenser nos politiques dans le cadre des limites planétaires: La Pensée écologique, N° 3(1), 19-37. <https://doi.org/10.3917/lpe.003.0019>
- Boval, M., Angeon, V., & Rudel, T. (2017). Tropical grasslands: A pivotal place for a more multi-functional agriculture. *Ambio*, 46(1), 48-56. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0806-5>
- Callo-Concha, D., Gaiser, T., Webber, H., Tischbein, B., Müller, M., & Ewert, F. (2013). Farming in the West African Sudan Savanna: Insights in the context of climate change. *African Journal of Agricultural Research*, 8(38), 4693-4705. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7153>
- Chebli, Y., Otmani, S. E., Chentouf, M., Hornick, J.-L., Bindelle, J., & Cabaraux, J.-F. (2020). Foraging Behavior of Goats Browsing in Southern Mediterranean Forest Rangeland. *Animals*, 10(2), 196. <https://doi.org/10.3390/ani10020196>
- Claps, S., Mecca, M., Di Trana, A., & Sepe, L. (2020). Local Small Ruminant Grazing in the Monti Foy Area (Italy): The Relationship Between

- Grassland Biodiversity Maintenance and Added-Value Dairy Products. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 546513. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.546513>
- Coleman, S. W. (2005). Predicting Forage Intake by Grazing Ruminants.
- Dossa, L. H., Rischkowsky, B., Birner, R., & Wollny, C. (2008). Socio-economic determinants of keeping goats and sheep by rural people in southern Benin. *Agriculture and Human Values*, 25(4), 581. <https://doi.org/10.1007/s10460-008-9138-9>
- Dossa, L. H., Sangaré, M., Buerkert, A., & Schlecht, E. (2015). Production objectives and breeding practices of urban goat and sheep keepers in West Africa : Regional analysis and implications for the development of supportive breeding programs. *SpringerPlus*, 4(1), 281. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1075-7>
- Dumortier, P., Gourlez De La Motte, L., Andriamandroso, A. L. H., Aubinet, M., Beckers, Y., Bindelle, J., De Cock, N., Lebeau, F., & Heinesch, B. (2021). Beef cattle methane emission estimation using the eddy covariance technique in combination with geolocation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 297, 108249. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108249>
- Dupuy, S., Jolivot, A., Lebourgeois, V., & Lelong, C. (2022). Guide technique pour la construction d'une base de données de vérité-terrain pour l'apprentissage et la validation des algorithmes de classification d'images satellites :Principes de base et manuel pratique mobilisant le logiciel QGIS et l'application QField. Cirad, Département Environnement et Société / Unité Mixte de Recherche. <https://agritrop.cirad.fr/602409/>
- Faber-Langendoen, D. (2020). Tropical, Temperate, and Mediterranean Grasslands of the World. *Encyclopedia of the World's Biomes*, 424-433. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12093-7>
- Fedele, V., Pizzillo, M., Claps, S., Morand-Fehr, P., & Rubino, R. (1993). Grazing behavior and diet selection of goats on native pasture in Southern Italy. *Small Ruminant Research*, 11(4), 305-322. [https://doi.org/10.1016/0921-4488\(93\)90002-Y](https://doi.org/10.1016/0921-4488(93)90002-Y)
- Feldt, T., & Schlecht, E. (2016). Analysis of GPS trajectories to assess spatio-temporal differences in grazing patterns and land use preferences of domestic livestock in southwestern Madagascar. *Pastoralism*, 6(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s13570-016-0052-2>

- Fernandes, F. D., Ramos, A. K. B., Jank, L., Carvalho, M. A., Martha Jr., G. B., & Braga, G. J. (2014). Forage yield and nutritive value of *Panicum maximum* genotypes in the Brazilian savannah. *Scientia Agricola*, 71(1), 23-29. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162014000100003>
- Fernandes, G. W., Coelho, M. S., Machado, R. B., Ferreira, M. E., Aguiar, L. M. D. S., Dirzo, R., Scariot, A., & Lopes, C. R. (2016). Afforestation of savannas : An impending ecological disaster. *Natureza & Conservação*, 14(2), 146-151. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.08.002>
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Gasigwa Sabimana, R., Baenyi Simon, P., & Kizungu Vumilia, R. (2018). Paramètres de reproduction et de dynamique de population de la chèvre locale de Mbanza-Ngungu en République démocratique du Congo. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 70(3), 93-97. <https://doi.org/10.19182/remvt.31522>
- Grillot, M., Guerrin, F., Gaudou, B., Masse, D., & Vayssières, J. (2018). Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model. *Environmental Modelling & Software*, 107, 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.003>
- Hatcher, G. A., Warrick, J. A., Ritchie, A. C., Dailey, E. T., Zawada, D. G., Kranenburg, C., & Yates, K. K. (2020). Accurate Bathymetric Maps From Underwater Digital Imagery Without Ground Control. *Frontiers in Marine Science*, 7, 525. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00525>
- Hirata, M., Okuma, T., Tanaka, Y., & Tobisa, M. (2016). Sward characteristics, nutritive value and choice by cattle of conterminous monocultures of centipedegrass (*Eremochloa ophiuroides*) and bahiagrass (*Paspalum notatum*). *Animal Science Journal*, 87(5), 674-680. <https://doi.org/10.1111/asj.12474>
- Huruba, R., Mlambo, T., Mundy, P. J., Sebata, A., & MacFadyen, D. N. (2018). Short duration overnight cattle kraaling in natural rangelands : Implications for grass composition, quality, above ground biomass, species diversity and basal cover. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 257, 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.004>

- IPBES. (2018). The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3237392>
- Jolivot, A., & Dupuy, S. (2023, février). Formation à la réalisation d'une carte d'occupation du sol à partir d'images Sentinel2. Travaux pratiques avec OTB et QGIS. Cirad, Département Environnement et Société, Unité Mixte de Recherche Territoire Environnement Télédétection et Information Spatiale. <https://agritrop.cirad.fr/604433/>
- Kay, M., & Wobbrock, J. (2016). ARTool : 0.10.0 (Version v0.10.0) [Logiciel]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.44586>
- Kembelo, P. K., Bakwaye, F. N., Katula, H. B., Vanhove, W., & Van Damme, P. (2021). Ethnobotanical characterization of medicinal plants used in Kisantu and Mbanza-Ngungu territories, Kongo-Central Province in DR Congo. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 17(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s13002-020-00428-7>
- Kuyah, S., Sileshi, G. W., Nkurunziza, L., Chirinda, N., Ndayisaba, P. C., Dimobe, K., & Öborn, I. (2021). Innovative agronomic practices for sustainable intensification in sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(2), 16. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00673-4>
- Lausch, A., Blaschke, T., Haase, D., Herzog, F., Syrbe, R.-U., Tischendorf, L., & Walz, U. (2015). Understanding and quantifying landscape structure – A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. *Ecological Modelling*, 295, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.018>
- Lee, S., & Kim, Y. (2023). Non-invasive measurement of circadian clock activity in the turquoise killifish. *STAR Protocols*, 4(2), 102261. <https://doi.org/10.1016/j.xpro.2023.102261>
- Lemaire, G., Franzluebbers, A., Carvalho, P. C. D. F., & Dedieu, B. (2014). Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 4-8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>
- Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, L., Cubasch, U., Perlwitz, J., & Roeckner, E. (1993). The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Climate Research*, 3, 177-193. <https://doi.org/10.3354/cr003177>

- Loola, B. (2025). Développement rural comme frein à l'exode rural et levier à l'exode urbain en République Démocratique du Congo. In *Revue Internationale de la Recherche Scientifique (Revue-IRS)* - ISSN : 2958-8413. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17073422>
- Losch, B. (2016). Structural transformation to boost youth labour demand in sub-Saharan Africa : The role of agriculture, rural areas and territorial development. International Labour Office. Employment Policy Dept, 204, 65p.
- Lu, C. D., Kawas, J. R., & Mahgoub, O. G. (2005). Fibre digestion and utilization in goats. *Small Ruminant Research*, 60(1-2), 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.06.035>
- Marín, D., Martino, G. D., Guenni, O., & Guédez, Y. (2001). Biomasse et productivité de la strate herbacée des savanes de l'Etat de Guarico (Venezuela).
- Matta, F. D. P., Fávero, A. P., Vigna, B. B. Z., Pozzobon, M. T., De Medeiros, S. R., Júnior, W. B., & Cavallari, M. M. (2023). Agronomic, nutritive value, reproductive, cytogenetic, and molecular aspects of *Paspalum* accessions : Contribution to the development of new forage cultivars. *Grass and Forage Science*, 78(1), 101-118. <https://doi.org/10.1111/gfs.12600>
- McNew, L. B., Dahlgren, D. K., & Beck, J. L. (Éds.). (2023). *Rangeland Wildlife Ecology and Conservation*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-34037-6>
- Meuret, M., Bartiaux-Thill, N., Bourbouze, A., Rosenberger, S., Vernerey, M., Sourbier, Y., Ninane, V., Trojan, M., Trojan, M., Rouchy, N., & André, J.-F. (1985). Evaluation de la consommation d'un troupeau de chèvres laitières sur parcours forestier—Méthode d'observation directe des coups de dents—Méthode du marqueur oxyde de chrome. *Annales de Zootechnie*, 34(2), 159-180. <https://doi.org/10.1051/animres:19850203>
- Meuret, M., & Provenza, F. (2015). How French shepherds create meal sequences to stimulate intake and optimise use of forage diversity on rangeland. *Animal Production Science*, 55(3), 309. <https://doi.org/10.1071/AN14415>
- Mishra, G., Giri, K., Jangir, A., Vasu, D., & Rodrigo-Comino, J. (2021). Understanding the effect of shifting cultivation practice (slash-burn-cultivation-abandonment) on soil physicochemical properties in the North-eastern Himalayan region. *Investigaciones Geográficas*, 76, 243. <https://doi.org/10.14198/INGEO.17820>

- Molinario, G., Hansen, M. C., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Stehman, S., Barker, B., & Humber, M. (2017). Quantification of land cover and land use within the rural complex of the Democratic Republic of Congo. *Environmental Research Letters*, 12(10), 104001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8680>
- Muntifering, R. B., Crosby, D. D., Powell, M. C., & Chappelka, A. H. (2000). Yield and quality characteristics of bahiagrass (*Paspalum notatum*) exposed to ground-level ozone. *Animal Feed Science and Technology*, 84(3-4), 243-256. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(00\)00124-3](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(00)00124-3)
- Muramoto, J., Ellis, E., Li, Z., Machado, R., & Gliessman, S. (2000). Field-Scale Nutrient Cycling and Sustainability: Comparing Natural and Agricultural Ecosystems. In S. Gliessman (Éd.), *Agroecosystem Sustainability* (Vol. 20002349, p. 121-134). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420041514.ch8>
- Namonje-Kapembwa, T., Chiwawa, H., & Sitko, N. (2022). Analysis of goat production and marketing among smallholder farmers Zambia. *Small Ruminant Research*, 208, 106620. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2022.106620>
- Nasiru, A., Ibrahim, M. H., & Ismail, N. (2014). Nitrogen losses in ruminant manure management and use of cattle manure vermicast to improve forage quality. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 3(2), 57.
- Ndonga, A., Kambashi, B., Beckers, Y., Moulin, C.-H., & Bindelle, J. (2024). Contribution of traditional goat farming systems to the sustainable intensification of smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: The example of the western part of the Democratic Republic of Congo. *Farming System*, 2(2), 100079. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100079>
- Orina, P. S., Chepkirui, M., Orina, T., Olala, M., & Oluwole, F. (2024). A Review on Africa's Agricultural Farming Systems and Potential for Transition. *Collective Journal Of Agricultural Sciences*, 01-08. <https://doi.org/10.70107/collectjagricsci-ART0032>
- Ouachinou, J. M.-A. S., Adomou, A. C., Dassou, G. H., Yedomonhan, H., Tossou, G. M., & Akoegninou, A. (2017). Connaissances et pratiques ethnobotaniques en médecines traditionnelles vétérinaire et humaine au Bénin: Similarité ou dissemblance? *Journal of Applied Biosciences*, 113(1), 11174. <https://doi.org/10.4314/jab.v113i1.6>

- Ouédraogo, K., Zaré, A., Korbéogo, G., Ouédraogo, O., & Linstädter, A. (2021). Resilience strategies of West African pastoralists in response to scarce forage resources. *Pastoralism*, 11(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s13570-021-00210-8>
- Over, J.-S. R., Ritchie, A. C., Kranenburg, C. J., Brown, J. A., Buscombe, D., Noble, T., Sherwood, C. R., Warrick, J. A., & Wernette, P. A. (2021). Processing Coastal Imagery With Agisoft Metashape Professional Edition, Version 1.6—Structure From Motion Workflow Documentation (Nos. 2021–1039; U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1039, p. 46p).
- Paciullo, D. S. C., Gomide, C. A. M., Castro, C. R. T., Maurício, R. M., Fernandes, P. B., & Morenz, M. J. F. (2017). Morphogenesis, biomass and nutritive value of *Panicum maximum* under different shade levels and fertilizer nitrogen rates. *Grass and Forage Science*, 72(3), 590-600. <https://doi.org/10.1111/gfs.12264>
- Pedreira, B. C., Yasuoka, J. I., Helwig, D., Farney, J. K., & Sassenrath, G. F. (2024). Forage accumulation and nutritive value of ‘Wrangler’ bermudagrass hayfield in response to nitrogen and harvesting management. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 10(2), e70016. <https://doi.org/10.1002/cft2.70016>
- Piñeiro-Vázquez, A. T., Jiménez-Ferrer, G. O., Chay-Canul, A. J., Casanova-Lugo, F., Díaz-Echeverría, V. F., Ayala-Burgos, A. J., Solorio-Sánchez, F. J., Aguilar-Pérez, C. F., & Ku-Vera, J. C. (2017). Intake, digestibility, nitrogen balance and energy utilization in heifers fed low-quality forage and *Leucaena leucocephala*. *Animal Feed Science and Technology*, 228, 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.04.009>
- Plexida, S. G., Sfougaris, A. I., Ispikoudis, I. P., & Papanastasis, V. P. (2014). Selecting landscape metrics as indicators of spatial heterogeneity—A comparison among Greek landscapes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.001>
- Prell, J., & Poole, P. (2006). Metabolic changes of rhizobia in legume nodules. *Trends in Microbiology*, 14(4), 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.02.005>
- Rodrigues Da Cruz, P. J., Vieira Da Silva, D., De Lima, I. B. G., Alves, G. C., Homem, B. G. C., Alves, B. J. R., Boddey, R. M., Sbrissia, A. F., & Casagrande, D. R. (2024). Marandu palisade grass-forage peanut mixed pastures: Forage intake, animal behaviour, and canopy structure as

- affected by grazing intensities. *Grass and Forage Science*, gfs.12688.
<https://doi.org/10.1111/gfs.12688>
- Rotz, C. A., Oenema, J. & Van Keulen, H. (2006). Whole farm management to reduce nutrient losses from dairy farms: a simulation study. *Applied Engineering in Agriculture*, 22(5), 773-784.
<https://doi.org/10.13031/2013.21992>
- 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(3), 229-247.
<https://doi.org/10.1007/s10705-008-9239-2>
- Rufino, M. C., Rowe, E. C., Delve, R. J., & Giller, K. E. (2006). Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(4), 261-282.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.028>
- Schlecht, E., Hiernaux, P., Kadaouré, I., Hülsebusch, C., & Mahler, F. (2006). A spatio-temporal analysis of forage availability and grazing and excretion behaviour of herded and free grazing cattle, sheep and goats in Western Niger. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113(1-4), 226-242.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.09.008>
- Sejian, V., Silpa, M. V., Chauhan, S. S., Bagath, M., Devaraj, C., Krishnan, G., Nair, M. R. R., Anisha, J. P., Manimaran, A., Koenig, S., Bhatta, R., & Dunshea, F. R. (2021). Eco-Intensified Breeding Strategies for Improving Climate Resilience in Goats. In M. K. Jhariya, R. S. Meena, & A. Banerjee (Éds.), *Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture* (p. 627-655). Springer Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3_18
- Sherwood, C. R., Warrick, J. A., Hill, A. D., Ritchie, A. C., Andrews, B. D., & Plant, N. G. (2018). Rapid, Remote Assessment of Hurricane Matthew Impacts Using Four-Dimensional Structure-from-Motion Photogrammetry. *Journal of Coastal Research*, 34(6), 1303.
<https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00016.1>
- Sokupa, M. I., Mupangwa, J. F., Washaya, S., Tikwayo, S. E., & Mopipi, K. (2024). The nutritive value of *Panicum maximum* and, *Brachiaria brizantha* grass species. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science*, 73(1-2), 1-9.
<https://doi.org/10.1080/09064702.2023.2249903>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.004>
- 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(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x>
- Steinmetz, L., Veysset, P., Benoit, M., & Dumont, B. (2021). Ecological network analysis to link interactions between system components and performances in multispecies livestock farms. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(3), 42. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00696-x>
- Tchouamo, I. R., Tchoumboué, J., & Thibault, L. (2005). Caractéristiques socio-économiques et techniques de l'élevage de petits ruminants dans la province de l'ouest du Cameroun. *Topicultura*, 4(23), 201-211.
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Vandermeulen, S., Ramírez-Restrepo, C. A., Marche, C., Decruyenaere, V., Beckers, Y., & Bindelle, J. (2018). Behaviour and browse species selectivity of heifers grazing in a temperate silvopastoral system. *Agroforestry Systems*, 92(3), 705-716. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0041-x>
- Vangu, G. P., Mobambo, K. N., Omondi, B. A., & Staver, C. (2023). Evaluation des performances du plantain en systèmes de cultures associées pérennes en zone savanicole au Kongo central en République Démocratique du Congo. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 17(4), 1443-1455. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v17i4.13>
- Veldman, J. W., Overbeck, G. E., Negreiros, D., Mahy, G., Le Stradic, S., Fernandes, G. W., Durigan, G., Buisson, E., Putz, F. E., & Bond, W. J. (2015). Where Tree Planting and Forest Expansion are Bad for Biodiversity and Ecosystem Services. *BioScience*, 65(10), 1011-1018. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv118>
- Wang, J., Wang, D., Li, C., Seastedt, T. R., Liang, C., Wang, L., Sun, W., Liang, M., & Li, Y. (2018). Feces nitrogen release induced by different large herbivores in a dry grassland. *Ecological Applications*, 28(1), 201-211. <https://doi.org/10.1002/eap.1640>

- Wasso, D. S., Akilimali, J. I., Patrick, B., & Bajope, J. B. (2019). Élevage caprin : Situation actuelle, défis et impact socioéconomique sur la population du territoire de Walungu, République Démocratique du Congo. *Journal of Applied Biosciences*, 129(1), 13050. <https://doi.org/10.4314/jab.v129i1.8>
- Zampaligré, N., Dossa, L. H., & Schlecht, E. (2013). Contribution of browse to ruminant nutrition across three agro-ecological zones of Burkina Faso. *Journal of Arid Environments*, 95, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.03.011>
- Zeng, L., & Chen, C. (2018). Using remote sensing to estimate forage biomass and nutrient contents at different growth stages. *Biomass and Bioenergy*, 115, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.016>

Chapitre 5

**Flux d'azote dans les compartiments de
l'agroécosystème exploités par les chèvres
en pâturage libre**

Ce chapitre est issu de l'intégralité de l'article ci-dessous, en préparation pour soumission dans le journal *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (Springer Nature Link) ou *Environment, Development and Sustainability* (Springer Nature Link).

Ndona, A., Essomandan Kokah, U., Kambashi, B., Moulin, C.-H., Beckers, Y., & Bindelle, J. (à soumettre). "Nitrogen recycling and fluxes across agroecosystem compartments under extensive free-ranging systems in Sub-Saharan Africa: case study in smallholder goat farming at western part of Democratic Republic of Congo"

5.1. Introduction

In subtropical agroecosystems, low soil fertility combined with the rapidly increasing demand for food constrains farmers to overexploit cultivated land and shorten fallow periods. These lands undergo accelerated degradation, leading to a further decrease in soil fertility and subsequent crop yields (Schlecht et al., 2004).

To prevent land degradation from taking place under these conditions, several studies have demonstrated that Integrated Crop-Livestock Systems (ICLS) represent a viable and effective alternative, enabling sustainable ecological intensification by enhancing plant and animal interactions within an agroecosystem. Such integration enhances nutrient recycling through animal excreta that stimulate soil life, increase organic matter contents and soil fertility. Additionally, crop residues and intercrops can serve as livestock feed (Rufino et al., 2009; Bonaudo et al., 2014; Grillot, Guerrin, et al., 2018a; Stark et al., 2018; Steinmetz et al., 2021).

Within an ICLS, herbivores become a key actor of soil fertility, functioning as intermediated agents of nutrient transfer and redistribution within the agroecosystem (Augustine et al., 2003; Schlecht et al., 2004; Grillot et al., 2018b; Huruba et al., 2018; Audouin et al., 2024). Therefore, the sustainability of agroecosystem productivity in Sub-Saharan Africa (SSA), where ICLS are implemented, depends largely on the efficiency with which nutrients are mobilized, transformed, and recycled by domestic animals (Rufino et al., 2006).

The Ecological Network Analysis (ENA) as nutrient recycling model has been applied in previous studies to evaluate ICLS performance and to assess farm-level dependence on external nutrient inputs. This approach is grounded in the theory of ecosystem network interactions among structural and functional compartments, focusing on inputs, outputs, and internal nutrient flows within all identified compartments of an agroecosystem (Fath & Scharler, 2019).

The earlier nutrients fluxes studies primarily focused on agroecosystem performance indicators, particularly nitrogen (N) flows between functional agroecosystem compartments in which crop and livestock activities interact directly or indirectly. Such flows provide insights into the degree of ecological intensification and sustainability of the system at farm or landscape scale (Stark et al., 2016; Grillot et al., 2018; Stark et al., 2018; Steinmetz et al., 2021). However, the specific contribution of each animal species to nutrient recycling, and the consequences of nutrient transfers across agroecosystem compartments relying on each specific breeding method, remain insufficiently evaluated in SSA conditions.

Despite the widespread importance of goats in SSA farming systems (Daniel M. Komwihangilo, 2012), their specific role in nitrogen recycling within

agroecosystems remains underexplored. In this line, answering the extent on which free ranging goats contribute to nutrient dispersion, recycling and transfer across agroecosystem compartments remains insufficiently studied and poorly documented.

Given the spatial configuration of agroecosystems characterized by high fragmentation, marked heterogeneity of structural and functional agroecosystem compartments, and moreover diverse forage species with widely varying nutritional values (Ndonga et al., 2025), we hypothesise that nutrient transfer and recycling in general, and more specifically nitrogen dynamics across agroecosystem compartments by free ranging goats, may vary considerably depending on herd management strategies.

Therefore, elucidating the role of free-ranging goats in shaping nitrogen flux dynamics across different agroecosystem compartments is of particular importance for optimizing crop and livestock components integration and ecological intensification.

From the perspective of integrating goats into ICLS design, knowledge of the magnitude and pathways of nutrient fluxes mobilized and redistributed by free-ranging goats could inform the development of management strategies and ICLS designs tailored to the specific agroecological contexts of SSA.

This study therefore aims (1) to evaluate and to compare the nitrogen fluxes among agroecosystem compartments under extensive free-ranging goat farming systems and, (2) to identify and assess management practices capable of strengthening nitrogen transfers toward agricultural land compartments devoted to crop production.

By identifying, promoting and adopting such practices, ecological intensification process throughout nitrogen transfer to cropland compartments could be improved in smallholder farms, thereby reducing dependence on external-based nitrogen inputs while strengthening resilience, enhancing productivity and sustainability of farming systems in SSA, consistent with the agroecology principles (Bonaudo et al., 2014; Gliessman et al., 2017; Stark et al., 2018; Altieri & Nicholls, 2020).

5.2. Materials and Methods

5.2.1. Study area

The study was conducted in four villages in the western part of the Democratic Republic of Congo: Masamuna, Mosango, Ngeba, and Kikola (Fig. 1). Ngeba

(5°11'58" S, 15°12'55" E) and Kikola (5°06'22" S, 15°06'09" E) are located in the Kongo Central Province, while Masamuna (4°48' S, 17°37' E) and Mosango (4°50' S, 18°06' E) lie in Kwilu Province. These sites are dominated by savannah ecosystems interspersed with gallery forests along rivers and wetlands (Ndona et al., 2024).

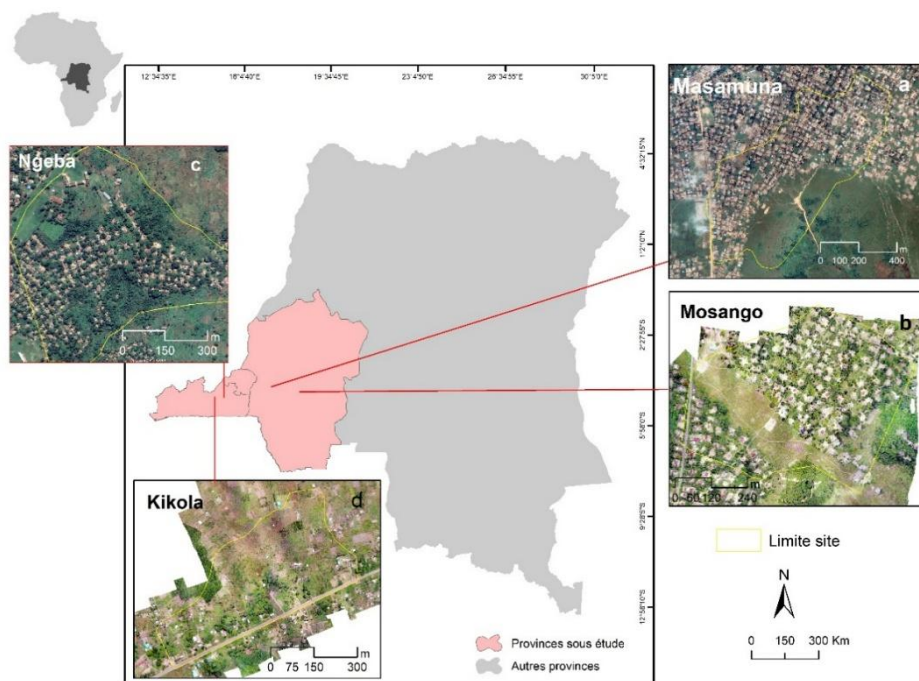


Figure 5-1. Study area

According to the International Vegetation Classification (IVC), these areas fall within the “West-Central African Mesic Woodland and Savannah” division (Faber-Langendoen, 2020). Increasing overexploitation has caused land degradation and declining soil fertility. Despite this, the savannahs provide extensive forage resources for goat husbandry.

The climate is classified as Aw4 under Köppen’s system (Lohmann et al., 1993), corresponding to a tropical-humid Sudanian climate with two distinct seasons. The dry season lasts for about four months (mid-May to mid-September) in Mosango and Masamuna, but it extends to five months (until mid-October) in Ngeba and Kikola. The rainy season spans over roughly eight months. Mean annual temperatures range between 25 and 28°C, with average annual rainfall around 1.400 mm (Ndona et al., 2024).

5.2.2. Experiment design

A previous study on free-ranging goat farming in western region of DRC (Ndona et al., 2025) mapped the agroecosystem compartments exploited by goats. It also evaluated their relative contributions to the diet, in terms of dry matter intake, forage diversity, and nutritional value including crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), and digestibility. These findings provided the basis for establishing nitrogen (N) balances across compartments in the present study.

Following Bellanger et al. (2025), nitrogen balances within agroecosystem compartments were assessed by comparing N outflow from forage consumption with N inflow from goat excreta. Recycling efficiency was calculated as the ratio of outflow to inflow N within each compartment (Rufino et al., 2006). Ecological Network Analysis (ENA) was used as the analytical framework, as it evaluates interactions among structural and functional compartments by tracing nutrient inflows, outflows, and internal circulation (Chen & Chen, 2015; Fath & Scharler, 2019; Piezer et al., 2019; Xia & Chen, 2020).

Measuring biomass and nutrient fluxes in free-ranging systems is challenging because of animal mobility and the unpredictability of their grazing routes (Diarisso et al., 2015). Earlier studies often relied on farmer interviews to delineate agroecosystem compartments (Stark et al., 2016, 2018; Bellanger et al., 2025). For the present study, these compartments were identified by drone-based mapping and validated by GPS tracking of goats across grazed unit of land (Ndona et al., 2025).

This study focuses exclusively on the connection that GPS-tracked goats establish with the mapped compartments of the agroecosystem, specifically the following: agricultural lands (ALand, which grouped cultivated fields and fallows due to the rapid shift between the two), rangeland (RLand), the residu supply area (RSA), and the green hedgerow (GrHedge).

This approach improved the accuracy of identification of compartment exploited by goat. It also provided deeper insight into goat-mediated nutrient transfers within a given agroecosystem accros all these compartements.

Twelve adult female free-ranging goats were fitted with GPS collars and tracked for three consecutive grazing days from 8:00am to 5:30pm. This monitoring enabled the mapping of agroecosystem compartments (Figures 5.2a and 5.2b), identification of forage species consumed, and assessment of their nutritional value (CP, ADF, NDF and digestibility). The contribution of each compartment to goat diets was then evaluated based on the amount of dry matter intake and time spent grazing (Ndona et al., 2025).

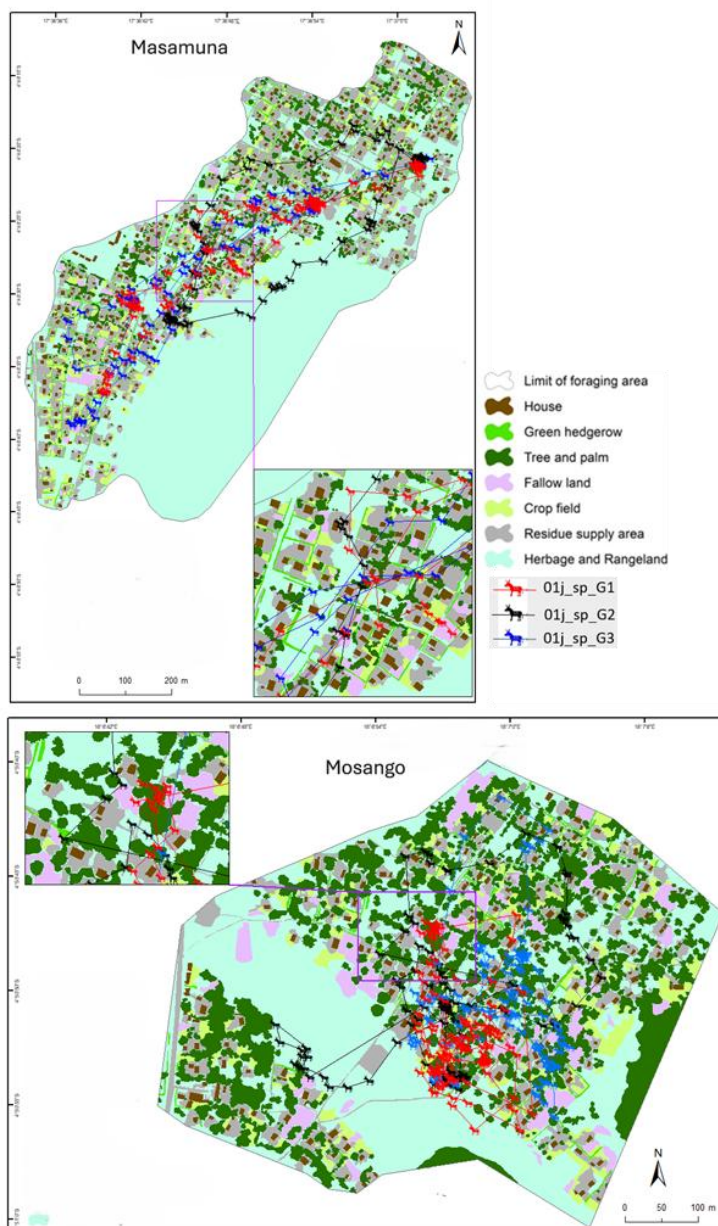


Figure 5-2 a. Land use maps of the spatial configuration of the mosaic of patches of CoFA within the agroecosystems exploited by free-ranging goats. The red, blue, and black lines exemplify georeferenced movement tracks recorded by GPS-collared goats (G1, G2, and G3) on day 1 of monitoring during rainy season on the Masamuna and Mosango sites, Kwilu province.

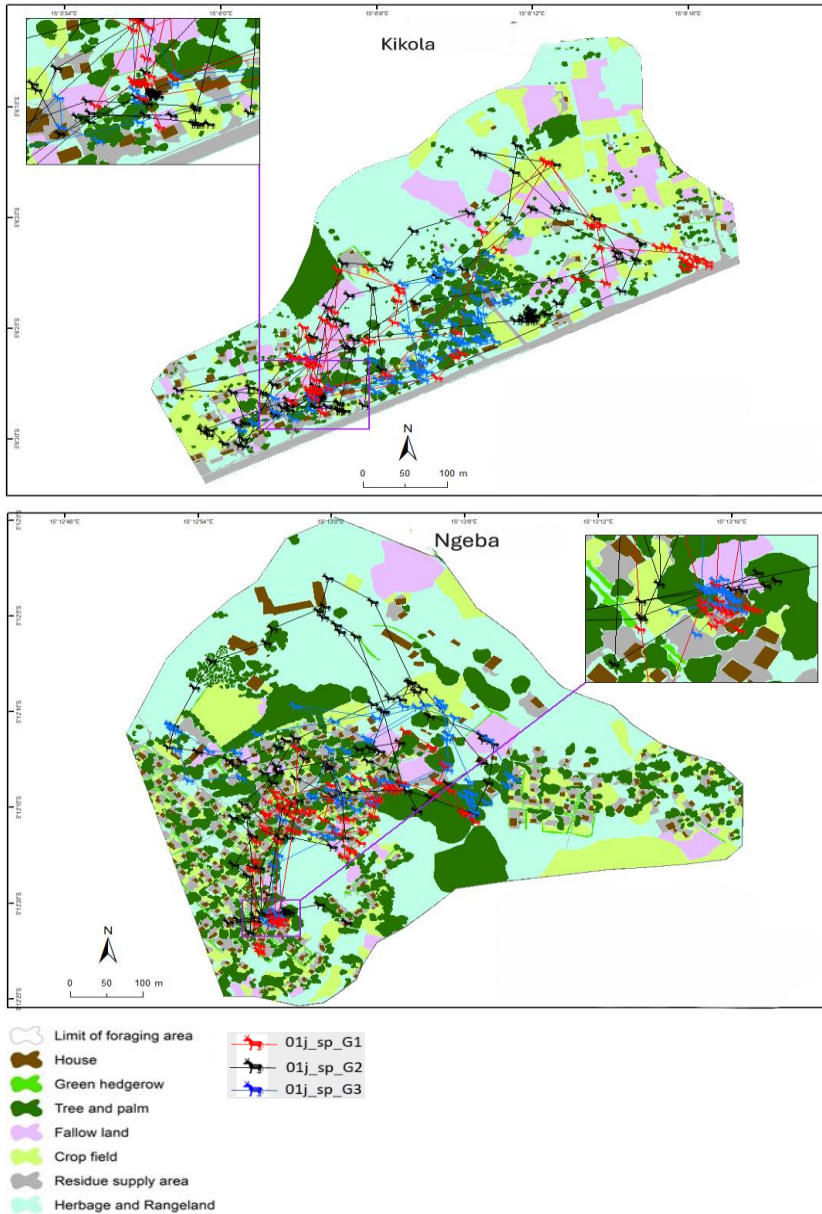


Figure 5-3 b. Land use maps of the spatial configuration of the mosaic of patches of CoFA within the agroecosystems exploited by free-ranging goats. The red, blue, and black lines exemplify georeferenced movement tracks recorded by GPS-collared goats (G1, G2, and G3) on day 1 of monitoring during rainy season on the Kikola and Ngeba sites, Kongo-Central province

From these GPS tracks and UAV-based maps (Figures 5.2a and 5.2b), a conceptual model of nitrogen fluxes (Figure 5.3) was developed considering different compartments exploited by free-ranging goat.

In opposite to Figures 5.2a and 5.2b where seven land-use classes were identified and mapped, the conceptual model of nitrogen fluxes take account of four compartments of foraging area (CoFA) exploited (ALand, RLand, RSA and GrHedge) because of on one hand, trees and palm stands were excluded as independent compartments as they are spatially embedded within cultivated fields, fallows, savannas, or household areas. On other hand, cultivated fields and fallows were grouped into a single category, termed “agricultural land.” This aggregation reflects the rapid transitions that occur between these two land-use types, as they are predominantly associated with annual and short-cycle crops, including some horticultural species with growth cycles of less than three months.

Table 5-1. Extent of different compartments exploited (CoFA)

Site	CoFA	n	Total area	
			(m ²)	%
Kikola	ALand*	97	53570	27.3
	RLand	372	122985	62.8
	RSA	78	19164	9.8
	GrHedge	9	225	0.1
Masamuna	ALand*	405	35882	11.5
	RLand	372	113185	36.4
	RSA	525	145229	46.7
	GrHedge	389	16832	5.4
Mosango	ALand*	202	37426	11.8
	RLand	470	220804	69.7
	RSA	212	54694	17.3
	GrHedge	100	3857	1.2
Ngeba	ALand*	208	67422	18
	RLand	298	254381	67.8
	RSA	291	48375	12.9
	GrHedge	117	5030	1.3

ALand* included fallows and cultivated lands where various vegetable and food crops (*Manihot spp*; *Ipomoea spp*, *Arachis hypogaea*, *Zea mays*, *Musa acuminata*, etc.) are mostly cultivated

This conceptual model highlights goats as both structural and functional intermediaries, transferring N across agroecosystems compartments through forage intake and excreta deposition. Nitrogen outflows were defined as N from forage consumed, while inflows corresponded to N from excreta, either collected in night shelters for cropped land or released in grazing areas.

These fluxes in addition to respective losses allowed us to calculate N balances for each compartment and were expressed as daily means per goat ($\text{g N goat}^{-1} \text{ day}^{-1}$) to enable extrapolation for different herd sizes and grazing durations.

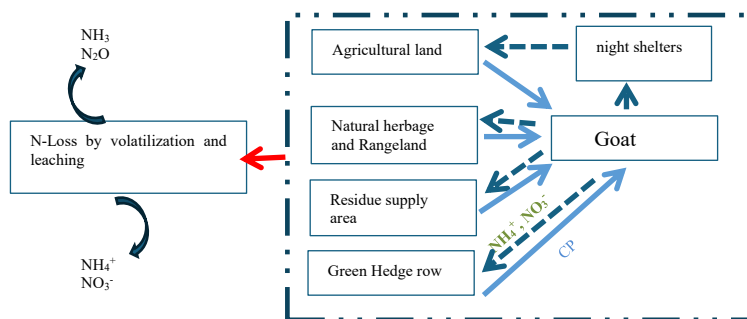


Figure 5-4. Conceptual model of N-flow mediated by goat within agroecosystem compartments. The recycling of nitrogen occurs via excreta (NH_4^+ , NO_3^-) and forage intake (CP). The dashed arrows illustrate the direct N-inflow of a compartment, from goat excreta released during foraging, or the indirect inflow via farmer practices of collecting goat manure from night shelters and using it as fertilizer in agricultural land. The full arrows represent N-outflow, which is exported through forage intake (crude protein: CP) from an agroecosystem compartment. It is important to note that additional losses occur through volatilisation/gaseous emissions (NH_3 and N_2O), and leaching (NH_4^+ and NO_3^-)

5.2.3. Data collection

5.2.3.1. Variables for nitrogen flux estimation

To evaluate nitrogen (N) fluxes, we quantified several variables: nitrogen ingested by goats (N_{ing}), nitrogen returned to compartments (N_{rest}), nitrogen lost (N_{los}), and nitrogen allocated to animal production (N_{pz}).

5.2.3.1.1. Nitrogen ingested (N_{ing})

N_{ing} represents the total N intake by goats through consumed forage in each identified and mapped agroecosystem compartment (ALand, RLand, RSA, and GrHedge).

The amount of N_{ing} was estimated from crude protein (CP) intake derived from dry matter intake data reported in previous studies conducted over the same period and on the same individual goat of the herd (Ndona et al., 2025).

Within the ENA framework, N_{ing} corresponds to the sum of outflows from exploited agroecosystem compartments. It was calculated as:

$$N_{ing} = \sum_{i=1}^n N_{ingCi} \quad (1)$$

where N_{ingCi} is the nitrogen intake from the compartment i .

5.2.3.1.2. Nitrogen returned (N_{rest}) and lost (N_{los})

N_{rest} corresponds to the nitrogen recycled to compartments via goat excreta, including feces and urine.

To quantify N_{rest} , each GPS-tracked goat was isolated in night shelter upon returning in the evening. Excreta from each goat were collected every morning for three consecutive days, during both the rainy and dry seasons. Nitrogen content in the collected samples was determined using the Kjeldahl method (AOAC method 981.10; AOAC, 1990), was allocated to cropland compartments.

By contrast, excreta released in savannahs, residue supply areas, and hedgerows could not have been measured directly and were estimated from forage *in vitro* digestibility and the proportion of time goats spent in each grazing unit here by agroecosystem compartment. Following Gac et al. (2007), N excretion was distributed proportionally to time spent in each agroecosystem compartment.

Consistent with previous studies, the analysis focused exclusively on goat-mediated nitrogen flows to evaluate the contribution of goats to crop–livestock interactions. Nitrogen inputs from symbiotic fixation, atmospheric deposition, and livestock species other than goats were excluded (Battheu-Noirfalise et al., 2024).

N_{rest} reflects all N inflows into agroecosystem compartments. We considered N losses (N_{los} 20%) due to volatilization in ammoniacal form, leaching, or percolation (Agyarko-Mintah et al., 2017; Cao et al., 2020). It was calculated as:

$$N_{rest} = (1-0.2) * (N_{fecNs} + \sum_{i=1}^n N_{restCi}) \quad (2)$$

Here, (1-0.2) accounts for 20% loss factor and N_{fecNs} is the fecal N collected in night shelters, which was redistributed to croplands, and N_{restCi} , the nitrogen released directly by goat within compartment “ i ” during grazing via both faeces (N_{fecCi}) and urine (N_{urCi}). N_{restCi} was determined as following:

$$N_{restCi} = N_{urCi} + N_{fecCi} \quad (3)$$

The urinary nitrogen released within compartments (N_{urC}) was estimated as the difference between total urinary N (N_{urTot}) and the portion released in night shelters (N_{urNs}):

$$N_{urC} = N_{urTot} - N_{urNs} \quad (4)$$

The latter was calculated as :

$$N_{urNs} = N_{urTot} * \frac{fecNs}{(1-Digest)*MSi} \quad (5)$$

Where:

$fecNs$ is the amount of faeces collected on a daily basis from the night shelter for a goat and $(1-Digest)*MSi$ is the amount of undigested MSi from the digestibility test, considered as experimental-based total faeces, since MSi is daily dry matter intake and $Digest$ is its digestibility coefficient.

$\frac{fecNs}{(1-Digest)*MSi}$ represented the ratio of amount of faeces collected daily within the night shelter to the total amount of faeces estimated based on daily MSi digestibility (Ndona et al., 2025 in press). The equation (5) assumes that urine and faeces realising within night shelters occurred approximately same time and had the same approximately frequency during the day (Schlecht et al., 2006).

N_{urTot} is the total daily urinary N amount, estimated as:

$$N_{urTot} = N_{ing} - N_{fecNs} - N_{fecC} - (N_{pz}/365) \quad (6)$$

Where

$$N_{fecC} = [(1-Digest) * MSi * \%N] - N_{fecNs} \quad (7)$$

As the excreta deposits are proportional to the time spent by the animals on the compartement (Grillot et al., 2018), the amount of faecal nitrogen (N_{fecC}) deposited in a given CoFA was assessed by multiplying N_{fecC} by the ratio of time spent in that compartment as proposed by Schlecht et al. (2006):

$$N_{fecCi} = N_{fecC} * \frac{TgpsCi}{\sum_{i=1}^n TgpsCi} \quad (8)$$

5.2.3.1.3. Nitrogen for zootechnical production(N_{pz})

N_{pz} represented the nitrogen used by a female goat for zootechnical production over one year, estimated from bibliographic values. It included the N allocated for foetal growth (F_{gr}), frequency of litter (L_{AnFr}), litter size (L_s), average birth weight of kids (B_w) (Tedonkeng Pamo et al., 2006; Omotosho et al., 2020) and milk production until weaning (Mba et al., 1975; Akinsoyinu et al., 1977; Odoemelam et al., 2013). It was calculated as:

$$N_{pz} = [(L_{AnFr} * L_s * B_w)] * [(N_{Fgr} + N_{lait})] \quad (9)$$

5.2.3.1.4. Nitrogen balance (N_{Bal})

The nitrogen balance(N_{Bal}) within a given compartment was calculated as:

$$N_{BalCi} = N_{restCi} - N_{ingCi} \quad (10)$$

A positive balance indicates net nutrient enrichment of the compartment, while a negative balance signals depletion (Haileslassie et al., 2007).

5.2.3.2. Identification of livestock practices likely to improve nitrogen balance in the Agricultural land compartment within agroecosystem

We performed in R Core Team's (2024) RStudio version 4.4.2 with Corrplot package, an overview of relationships to visualise correlation matrix of variables and Vegan package (community Ecology Package) for PCA (Fig 5.3) for the identification of positive and negative correlated variables to nitrogen balance within ALand compartments (Fig. 5.2a and 5.2b).

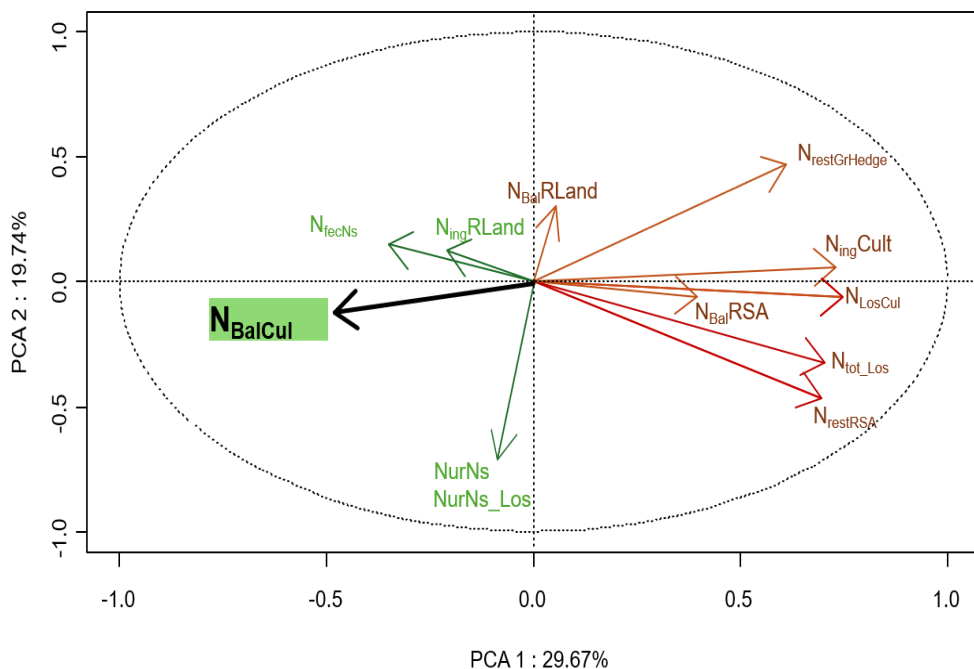


Figure 5-5. Correlation circle of variables for scenarios simulation: nitrogen balance within cultivated land (N_{BalCul}), nitrogen balance within range land ($N_{BalRLand}$), nitrogen balance within residu supply area (N_{BalRSA}), faecal nitrogen from night shelters (N_{fecNs}), urinary nitrogen from night shelters (N_{urNs}), urinary nitrogen lost from night shelters (N_{urNs_Los}), nitrogen lost from cultivated land (N_{LosCul}), total nitrogen lost (N_{tot_Los}), Nitrogen ingested from range land ($N_{ingRLand}$), nitrogen ingested from cultivated land (N_{ingCul}), nitrogen released directly by goat within green hedgerow ($N_{restGrHedge}$), nitrogen released directly by goat within residu supply area ($N_{restRSA}$).

Three variables emerged as the most relevant and manageable through farmer practices: faecal nitrogen from night shelters (N_{fecNs} : feces collected in night shelters and applied to croplands r^2 approximately 0.20), urinary nitrogen losses in night shelters (N_{urNs} , reflecting the absence of urine collection or retention systems “ r^2 ” approximately -0.10) and nitrogen ingested from croplands (N_{iCult}), since nitrogen balance N_{BalCul} is inversely related to the amount removed by grazing “ r^2 ” approximately -0.90).

These variables correspond to agricultural practices feasible in extensive goat husbandry, in the context of smallholder farmers in DRC. They were therefore retained as the basis for building alternative management scenarios.

5.2.3.3. Simulation of alternative scenarios

The baseline scenario (SC0) served as the reference, corresponding to typical traditional goat farming practices. In this extensive system, goats roamed freely from around 7:00AM to 5:30PM across all compartments foraging. They were then kept overnight in shelters without bedding from 5:30PM to 7:30AM. Only solid manure was collected from night shelters, while urinary nitrogen were entirely lost.

From this baseline scenario, seven alternative scenarios were developed (Table 5.2). They were structured around three potential management practices that could improve the nitrogen balance within agricultural land, under realistic farming conditions, avoiding unfeasible theoretical farming practice modelling as recommended by Ryschawy et al., (2014).

Firstly, extending time in night shelters. Increasing confinement allows farmers to recover larger amounts of feces (Augustine et al., 2003; Schlecht et al., 2004, 2006; Huruba et al., 2018). Maximum recovery would occur under full-day confinement (Rufino et al., 2006), but this option was excluded since goats must graze to meet their daily needs.

Secondly, reducing N-source intake from croplands. Restricting goats access to cultivated fields lowers competition for feed sources between livestock and humans (Herrero et al., 2023), thus reduced N soil depletion. Under this strategy, among agricultural lands, goats could mainly graze on fallow lands (Devineau, 1999).

Thirdly, using bedding in shelters. Bedding materials improve retention of urinary nitrogen due to their absorbent properties (Lagadec et al., 2013; Durant et al., 2021).

Table 5-2. Base line scenario (SC0) and seven others different (SC1-SC7) likely to improve N flow within ALand and RLand

Management options	Scenario	Remarque
Time spent in night shelters	SC0	The baseline scenario. Keep goats overnight in shelters without bedding from 6:00pm to 7:30am (\approx 14 hours)
	SC1	Over keep goats in night shelters from 6:00pm to 9:30am (\approx 16 hours) will allow \approx 15 % more feces released, thus assuming more fecal N collected
	SC2	Over keep goats in night shelters from 6:00pm to 11:30am (\approx 18 hours) will allow \approx 30 % more feces released, thus assuming more fecal N collected
Bedding in night shelters	SC3	Bedding night shelters improve urine retention by average 50%, thus will increase total cropland N to be returned
Restricted access to cultivated fields	SC4	Restricting goat access to croplands reduced forage intake from these areas to near zero, significantly decreasing nutrient outflow,
Mixed scenarios	SC5	Combining SC0 + SC3 + SC4
	SC6	Combining SC1 + SC3 + SC4
	SC7	Combining SC2 + SC3 + SC4

In order to evaluate opportunities for improving nitrogen recycling within integrated crop-livestock systems (ICLS), a series of management scenarios were simulated based on observed farming practices. The scenarios were designed to quantify the effects of alternative goat management strategies on manure collection, recovery of excreted nitrogen, and nutrient flows among agroecosystem compartments.

The baseline scenario (SC0) represented the management practices commonly observed in the study area. The goats were kept in shelters from 18:00 to 07:30 (approximately 14 h per day) without bedding. Nitrogen flows simulated under SC0 served as the reference against which all other scenarios were compared.

The effect of extending the time goats remained in night shelters was evaluated in scenarios SC1 and SC2. In the first scenario (SC1), the goats were confined for approximately 16 hours. In the second scenario (SC2), the confinement was extended to approximately 18 hours. It was hypothesised that an increase in the

duration of confinement would result in a greater proportion of feces being deposited and collected in night shelters. This, in turn, would lead to an increase in the amount of recoverable fecal nitrogen. It was hypothesised that, based on observed excretion patterns, there would be an increase in faecal collection of 15% in SC1 and 30% in SC2 relative to the baseline scenario.

The third scenario, hereafter referred to as SC3, was designed to evaluate the impact of incorporating bedding materials within night shelters. It was hypothesised that bedding would enhance urine retention and mitigate nitrogen losses. Consequently, urinary nitrogen recovery was assumed to be increased by 50%, resulting in a corresponding increase in the amount of nitrogen potentially available for recycling to cropland.

The fourth scenario, hereafter referred to as SC4, examined the effect of restricting goat access to cultivated fields. This practice led to a substantial reduction in forage intake from cultivated land, thereby limiting the direct nitrogen depletion resulting from the outflow from agricultural lands. Within the confines of the simulation, forage intake originating from cropland was reduced to a state of near-zero intake, thus enabling the evaluation of the impact of stricter grazing control on cropland nitrogen balances.

Finally, three integrated management scenarios were developed for the purpose of assessing the combined effects of multiple interventions. The baseline management scenario (SC0) was combined with bedding use (SC3) and restricted access to cultivated fields (SC4). SC6 combined extended confinement to 09:30 (SC1), bedding use (SC3), and restricted cropland access (SC4). The SC7 combination encompassed extended confinement to 11:30 (SC2), bedding use (SC3), and restricted cropland access (SC4).

Collectively, these scenarios exemplify a gradient of agroecological intensification, predicated on optimised management of internal nutrient flows. Their comparison allowed identification of management practices with the greatest potential to increase nitrogen recovery from goat excreta, improve agricultural land nitrogen balances, and strengthen integrated crop-livestock system.

5.2.4. Statistical Analyses

To compare N-fluxes across agroecosystem compartments, we first implemented the Kolmogorov–Smirnov and Levene's tests using car package in R Core Team's (2024) RStudio version 4.4.2 to check that the assumptions of normality and homogeneity of variance have not been violated among the variables reflecting the N-fluxes (N_{ing} , N_{rest} and N_{bal}).

As these assumptions were violated, we then implemented a two-way aligned rank transform (ART) ANOVA using the ARTool package, as alternative to the F-test (Mansouri et al., 2004; Kay & Wobbrock, 2016), to compare agroecosystem compartments under the typical smallholder free-ranging conditions, considering CoFA and season as fixed factors.

This procedure was also used to compare different scenarios within a single agroecosystem compartment, considering scenario and season as fixed factors. The Tukey's post hoc test was then performed when significant differences ($p < 0.05$) occurred, to compare pair-difference of CoFA or scenario within the same CoFA.

5.3. Results

Table 5-3. Dynamics of nitrogen within each compartment of the agroecosystem (CoFA) in dry (DS) and rainy season (RS), considering amount of Ning ($\text{g d}^{-1} \text{goat}^{-1}$ of ingested nitrogen), Nrest ($\text{g d}^{-1} \text{goat}^{-1}$ of nitrogen returned through excreta) and nitrogen balance ($\text{g d}^{-1} \text{goat}^{-1}$) under smallholder free-grazing conditions.

		N _{ing}	N _{rest}	N _{Bal}
Agricultural Land	RS	8.4±2.4	4.6±1.4	-3.8±1.8
	DS	4.9±1.4	3.4±0.9	-1.5±1.4
Range Land	RS	6.5±2.1	3.2±1.6	-3.2±1.9
	DS	5.9±2.3	2.5±1.1	-3.3±2
Residue supply area	RS	2.7±1.7	4.3±1.8	1.6±1.4
	DS	3±1.6	3.4±1	0.4±1.5
Green hedgerow	RS	1.4±1.2	0.8±0.8	-0.6±0.8
	DS	1.2±1	0.5±0.4	-0.7±0.8
p-value	CoFA	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	Season	< 0.001	< 0.001	0.083
	CoFA x Season	< 0.001	0.001	< 0.001

N-balance	positive
	negative

Nitrogen fluxes within the agroecosystem exploited by free-ranging goats (Table 5.2) varied significantly ($p < 0.001$) with compartment (CoFA) category, the season, and their interactions. The only exception was nitrogen balance (N_{bal}), which did not differ significantly between both rainy and dry seasons ($p = 0.083$).

Tukey's post hoc test showed that nitrogen ingested (N_{ing}) originated mainly from ALand and RLand ($p < 0.001$), rather than from Residue Supply Areas (RSA) and Green Hedgerows. N_{ing} values were generally higher in the rainy season than in the dry season ($p < 0.001$), except for N_{bal} .

In detail, 32.7–44.2% of N_{ing} came from the ALand, corresponding to 8.4 ± 2.4 g N goat⁻¹ d⁻¹ in the rainy season and 4.9 ± 1.4 g N goat⁻¹ d⁻¹ in the dry season, while the RLand contributed 34.2–39.3% of N_{ing} corresponding to 6.5 ± 2.1 g N goat⁻¹ d⁻¹ in the rainy season and 5.9 ± 2.3 g N goat⁻¹ d⁻¹ in the dry season. However, the RSA accounted for only 14.2–20% and GrHedge for 7.4–8%, less than RLand and ALand.

Additionally across all CoFA, N_{ing} amount were lower in the dry season than rainy, except within RSA, where goats consumed much more crop residues and household waste, in response to limited forage availability of the dry season, thus inflates the N_{ing} from RSA.

Overall, goats recycled within the agroecosystem, about 68% of N_{ing} during the rainy season and 65%, the dry season via their excreta. Nitrogen returns (N_{rest}) were greater within the ALand and RSA. In ALand, 35.7% of N_{rest} occurred during the rainy season (4.6 ± 1.4 g N goat⁻¹ d⁻¹) and 34.7%, the dry season (3.4 ± 0.9). Within RSA otherwise, N_{rest} were 33.3% in the rainy season (4.3 ± 1.8) and 34.7% in the dry season (3.4 ± 1.0). By contrast, RLand received only 24.8% and 25.5% of N_{rest} in the rainy and dry seasons respectively, while Green Hedgerows recorded the lowest amount of N_{res} (6.2% and 5.1%).

Daily nitrogen balances (N_{Bal}) however, were negative across all CoFA in both rainy and dry seasons, except in RSA, which showed positive balances: $+1.6 \pm 1.4$ g N goat⁻¹ d⁻¹ in the rainy season and $+0.4 \pm 1.5$ g N goat⁻¹ d⁻¹ in the dry season. The most negative balances occurred within the ALand during the rainy season (-3.8 ± 1.8) and RLand during the dry season (-3.3 ± 2.0). Although season alone did not significantly affect N_{bal} across CoFA ($p = 0.083$), its interaction with CoFA category was highly significant ($p < 0.001$).

Table 5-4. Summary of nitrogen (N) fluxes (g N d⁻¹ goat⁻¹) across CoFA categories under different management scenarios

		Agricultural Land			Range Land			Barren Land (RSA)			Green hedgerow		
		Ni	Nrest	NBalance	Ni	Nrest	NBalance	Ni	Nrest	NBalance	Ni	Nrest	NBalance
SC0	RS	8.36±2.4	4.57±1.4	-3.79±1.8	6.47±2.1	3.19±1.6	-3.28±1.9	2.68±1.7	4.29±1.8	1.62±1.4	1.43±1.2	0.84±0.8	-0.58±0.8
	DS	4.93±1.4	3.4±0.9	-1.54±1.4	5.85±2.3	2.53±1.1	-3.32±2	2.99±1.6	3.43±1	0.43±1.5	1.20±1	0.5±0.4	-0.70±0.8
SC1	RS	8.36±2.4	4.65±1.4	-3.71±1.8	6.46±2.1	3.19±1.6	-3.28±1.9	2.68±1.7	4.29±1.8	1.62±1.4	1.43±1.2	0.84±0.8	-0.59±0.8
	DS	4.94±1.4	3.48±0.9	-1.5±1.4	5.85±2.3	2.53±1.1	-3.32±2	2.99±1.6	3.43±1.0	0.43±1.5	1.20±1	0.50±0.4	-0.70±0.8
SC2	RS	8.36±2.4	4.73±1.4	-3.63±1.8	6.47±2.1	3.19±1.6	-3.28±1.9	2.68±1.7	4.29±1.8	1.62±1.4	1.43±1.2	0.84±0.8	-0.59±0.8
	DS	4.94±1.4	3.57±0.9	-1.37±1.4	5.85±2.3	2.53±1.1	-3.32±2	2.99±1.6	3.43±1.0	0.43±1.5	1.20±1	0.5±0.4	-0.71±0.8
SC3	RS	8.36±2.4	5.22±1.4	-3.14±1.8	6.47±2.1	3.19±1.6	-3.28±1.9	2.68±1.7	4.29±1.8	1.62±1.4	1.43±1.2	0.84±0.8	-0.59±0.8
	DS	4.94±1.4	4.0±0.9	-0.95±1.4	5.85±2.3	2.53±1.1	-3.32±2	2.99±1.6	3.43±1.0	0.43±1.5	1.20±1	0.50±0.4	-0.71±0.8
SC4	RS	3.73±1.0	2.16±0.6	-1.58±1.0	9.55±1.9	5.19±1.4	-4.36±1.7	2.85±1.8	3.94±1.7	1.09±1.5	1.48±1.2	0.78±0.7	-0.70±0.9
	DS	1.63±0.8	1.74±0.5	0.11±0.7	7.51±2.3	3.67±1.2	-3.84±1.7	3.01±1.6	2.98±0.8	-0.03±1.4	1.25±1.1	0.46±0.4	-0.80±0.9
SC5	RS	3.73±1.0	2.69±0.7	-1.04±1.0	9.55±1.9	5.19±1.4	-4.36±1.7	2.85±1.8	3.94±1.7	1.09±1.5	1.48±1.2	0.78±0.7	-0.70±0.9
	DS	1.63±0.8	2.2±0.6	0.57±0.7	7.51±2.3	3.67±1.2	-3.84±1.7	3.01±1.6	2.98±0.8	-0.03±1.4	1.25±1.1	0.46±0.4	-0.80±0.9
SC6	RS	3.73±1.0	2.91±0.7	-0.82±1.0	9.55±1.9	5.19±1.4	-4.36±1.7	2.85±1.8	3.94±1.7	1.09±1.5	1.48±1.2	0.78±0.7	-0.70±0.9
	DS	1.63±0.8	2.41±0.6	0.78±0.8	7.51±2.3	3.67±1.2	-3.84±1.7	3.01±1.6	2.98±0.8	-0.03±1.4	1.25±1.1	0.46±0.4	-0.80±0.9
SC7	RS	3.73±1.0	3.02±0.7	-0.71±1.0	9.55±1.9	5.19±1.4	-4.36±1.7	2.85±1.8	3.94±1.7	1.09±1.5	1.48±1.2	0.78±0.7	-0.70±0.9
	DS	1.63±0.8	2.52±0.6	0.89±0.8	7.51±2.3	3.67±1.2	-3.84±1.7	3.01±1.6	2.98±0.8	-0.03±1.4	1.25±1.1	0.46±0.4	-0.80±0.9
p-value	Scenario	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.999	0.197	0.012	1.000	0.998	0.965
	Season	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.033	0.103	< 0.001	< 0.001	0.017	< 0.001	0.076
	Scenario x Season	< 0.001	< 0.001	0.269	0.010	0.015	0.849	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000

N-balance	positive
	negative

The comparisons of nitrogen fluxes across scenarios and seasons within the same CoFA revealed significant differences ($p < 0.05$) in some compartments, while in others, scenarios did not differ significantly ($p > 0.05$).

Tukey's post hoc test confirmed pairwise differences linked to management practices. In ALand and RLand, N_{ing} did not differ significantly across scenarios, from SC0 to SC3 ($p > 0.05$). However from SC4 onward, N_{ing} values changed significantly ($p < 0.001$). In ALand for example, they declined from 8.36 ± 2.4 N goat⁻¹ d⁻¹ to 3.73 ± 1.0 g N goat⁻¹ d⁻¹ in the rainy season and from 4.93 ± 1.4 N goat⁻¹ d⁻¹ to 1.63 ± 0.8 N goat⁻¹ d⁻¹ in the dry season. In contrast, values in RLand increased from 6.47 ± 2.1 N goat⁻¹ d⁻¹ to 9.55 ± 1.9 N goat⁻¹ d⁻¹ (rainy season) and from 5.85 ± 2.3 N goat⁻¹ d⁻¹ to 7.51 ± 2.3 N goat⁻¹ d⁻¹ (dry season). In contrast to ALand and RLand, the N_{ing} values within RSA and GrHedge did not vary significantly across all scenarios ($p > 0.05$).

Similar to N_{ing} , N_{rest} within the RLand did not vary significantly across scenario from SC0–SC3 ($p > 0.05$). however from SC4 onward, N_{rest} revealed significant change ($p < 0.001$), reaching 5.19 ± 1.4 N goat⁻¹ d⁻¹ in the rainy season and 3.67 ± 1.2 N goat⁻¹ d⁻¹ in the dry season, both values higher than those for SC0-SC3 (Table 5.3).

However in ALand, N_{rest} values were similar only across SC0-SC2. Significant differences appeared from SC3, which recorded the highest values (5.22 ± 1.4 N goat⁻¹ d⁻¹ in the rainy season; 4.0 ± 0.9 N goat⁻¹ d⁻¹ in the dry season). Under SC4–SC7, N_{rest} values were lower but gradually increased: 2.16 ± 0.6 N goat⁻¹ d⁻¹ (RS) and 1.74 ± 0.5 N goat⁻¹ d⁻¹ (DS) for SC4; 2.69 ± 0.7 N goat⁻¹ d⁻¹ and 2.20 ± 0.6 N goat⁻¹ d⁻¹ for SC5; 2.91 ± 0.7 N goat⁻¹ d⁻¹ and 2.41 ± 0.6 N goat⁻¹ d⁻¹ for SC6; and 3.02 ± 0.7 N goat⁻¹ d⁻¹ and 2.52 ± 0.6 N goat⁻¹ d⁻¹ for SC7.

As for N_{ing} , no significant variations ($p > 0.05$) were found for N_{rest} within RSA and GrHedge.

Concerning nitrogen balances (N_{bal}), no significant variation were revealed across scenarios from SC0-SC3 within all CoFA ($p > 0.05$). However, within ALand, N_{bal} were significantly improved from SC4 onward ($p < 0.001$). These values increased from -1.58 ± 1.0 N goat⁻¹ d⁻¹ (RS) and 0.11 ± 0.7 N goat⁻¹ d⁻¹ (DS) for SC4 to -0.71 ± 1.0 N goat⁻¹ d⁻¹ and 0.89 ± 0.8 N goat⁻¹ d⁻¹ for SC7. These were markedly higher

than N_{bal} for scenario from SC0-SC3 ($-3.79 \pm 1.8 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ to $-3.14 \pm 1.8 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ in RS; $-1.54 \pm 1.4 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ to $-0.95 \pm 1.4 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ in DS).

In contrast, N_{bal} within RLand and RSA declined between SC3 and SC4, opposite to the trend previously observed within ALand. In RSA for example, N_{bal} dropped from $1.62 \pm 1.4 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ to $1.09 \pm 1.5 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (RS) and from 0.43 ± 1.5 to $-0.03 \pm 1.4 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (DS). Within RLand however, nitrogen deficits became more severe ($p < 0.001$), with values from SC4-SC7 ($-4.36 \pm 1.7 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ in RS; $-3.84 \pm 1.7 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ in DS) more negative than those from SC0-SC3 ($-3.28 \pm 1.9 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ in RS; $-3.32 \pm 2.0 \text{ N goat}^{-1} \text{ d}^{-1}$ in DS). In contrast, as for N_{ing} and N_{rest} within GrHedge, N_{bal} did not revealed significant differences across scenarios or seasons ($p > 0.05$).

5.4. Discussion

Free-ranging goats in smallholder farming play a central role in nitrogen fluxes within the agroecosystems they exploit. Their capacity to recycle nutrients through the dispersion of excreta across agroecosystem compartments has been widely documented (Augustine et al., 2003; Schlecht et al., 2004, 2006; Rufino et al., 2006; Diarisso et al., 2015; Grillot et al., 2018a, 2018b).

By consuming forage, goats, like other herbivores such as sheep and cattle, transfer substantial amounts of biomass and nutrients, particularly nitrogen, from grazing lands. The undigested fraction of ingested nitrogen is returned to the soil through faeces and urine, thereby enhancing soil fertility, promoting plant growth, and reducing the need for external nitrogen inputs (Schlecht et al., 2006; Battheu-Noirfalise et al., 2024). These returns occur directly, through excreta dispersed during grazing, or indirectly, via manure collected from night shelters and later applied to cropland.

Despite this recycling capacity, nitrogen flux redistribution, as shown in Tables 5.2 and 5.3 and resulting balances across agroecosystem compartments (CoFA) reveal strong contrasts. The efficiency of this process depends on the type of compartment, the season, herd management strategies, and manure handling. These contrasts highlight the complexity of agroecological interactions, where seasonality and grazing practices strongly influence nutrient dynamics. Such factors must be

considered when designing integrated crop-livestock systems (ICLS) adapted to local conditions.

In this study for instance, goats grazed freely without direct feed supplementation from local farmers, making herd management and seasonality highly influential factors in nitrogen dynamic. These influences displayed differences with really evidence in N-ingested by free ranging goat via forage consumption and N-returned via excreta within the various CoFA. Although goats are well adapted in such extensive systems to exploit marginal resources without any feed supplementation from local farmers (Silanikove, 2000), some compartments were N-benefited or N-depleted more than others, explaining the differences observed in goat excreta redistribution within the agroecosystem compartments. Such imbalanced pattern of nutrient dynamics in general, and particularly the nitrogen, were also reported in cattle and sheep due to different management systems implemented (Schlecht et al., 2006; Hailesslassie et al., 2007; Diarisso et al., 2015).

The higher value of nitrogen intake (N_{ing}) from Agricultural Land (ALand, up to 44.2%) and Rangeland (RLand, up to 39.3%), for instance, was consistent to their highest contribution to the total daily N_{ing} , averaged both 80%. This pattern reflects greater forage availability and species diversity in these compartments, especially during the rainy season when climatic conditions favour plant growth (Marín et al., 2001; Schlecht et al., 2004; Komwihangilo, 2012).

Guided by selective grazing behavior (Morand-Fehr, 2005), goats tend to target these high-value areas. As nutrient intake varies with forage selectivity, diet quality, and nutritional requirements, nitrogen returns (N_{rest}) also differ across compartments (Rufino et al., 2006). Achieving balance between N_{ing} and N_{rest} is challenging, for the maintenance of soil fertility and prevention nutrient depletion (Augustine et al., 2003). Excepted in case of existing of N-symbiotic fixation sources from legume forages (Prell & Poole, 2006; Barbieri et al., 2023), such balance within ALand and RLand is rarely reached when these CoFA are over exploited in extensive free-ranging systems because of the limitation of external.

This explains the generally negative nitrogen balances within ALand and RLand agroecosystem compartments, in where the N-outflow via forage consumption exceeded the N-inflow via goat excreta released (Schlecht et al., 2004, 2006; Diarisso et al., 2015). Additionally, this common situation in SSA croplands and

rangelands do not promote the desired horizontal transfer of nutrients from grassland to cultivated lands, as required for a standard agroecological intensification process within an ICLS (Powell et al., 1996).

In sub-Saharan Africa, Grillot et al. (2018a, 2018b) found that ALands near homesteads in supplemented free-ranging livestock systems generally exhibit positive nitrogen balances. Their proximity to night shelters promotes manure deposition and creates localized nitrogen-rich areas. Conversely, ALand situated farther from these shelters tend to experience negative nitrogen balances. A similar pattern has been observed in cattle-based systems receiving large amounts of externally sourced protein feeds. Where marketed crops are absent, the nitrogen returned through animal excreta is insufficiently recycled, resulting in nitrogen accumulation and surpluses within specific agroecosystem compartments (Battheu-Noirfalise et al., 2024).

An exception was in barren land compartement (RSA), where N-inflow exceeded the N-outflow exports. RSA thus acted as nitrogen sinks, since goats spent long periods resting or ruminating there, leading to high excreta deposition and could be considered as N-waste sources (Schlecht et al., 2006).

However, changes in livestock management strategies could make difference in nitrogen dynamic. The analyses of scenarios (SC0-SC7, Table 5.2) revealed that management some adjustments can significantly improve nitrogen balances than other.

Practices such as long confinement in night shelters (Schlecht et al., 2004; Diarisso et al., 2015), bedding use to reduce urinary nitrogen losses (Lagadec et al., 2013; Durant et al., 2021), and restricting access to cropped fields redirected nitrogen flows toward cropland, improving its balances. Additionally, increasing the contribution of woody forage (from GrHedge) and residues or household waste (from RSA) to feed goats during their confinement in shelters or night enclosures could be better ways to compensate the possible low intake due to over time confinement, and the restriction access to cropland. Moreover, it may enhance dejection releasing within night shelters and more nitrogen returns to cropland (Komwihangilo et al., 2012). These strategies align with recommendations emphasizing the rational management of animal mobility and biomass flows to optimize nutrient transfers toward plant component and, biogéochimiques cycles to

strengthen ecological process within a given agroecosystem (Schlecht et al., 2004; Valbuena et al., 2012; Tittonell & Giller, 2013; Jouven et al., 2022; Vayssières et al., 2022).

Thus, despite lower productivity and N-mobilization in contrast to intensive animal farming systems, extensive goat farming has shown its valuable potential on nutrients dynamics and recycling within agroecosystem compartments exploited. With appropriate practices such as residue management, grazing and resting time regulation, and bedding, the soil fertility could be improved by reducing nutrient losses or dispersion, particularly in ICLS where nitrogen targeted ALand.

However, Diarisso et al. (2015) noted the persistence of negative balances in ALand compartments of several smallholder farm under extensive system with less or no access complementary nutrient inputs. Therefore, animal manures spreading on degraded RLands or ALands could help prevent soil fertility depletion and sustainably improve its productivity (Schlecht et al., 2004; Vanlauwe et al., 2015).

Returning manure within degraded RLands or ALands for instance, not only replenish essential nutrients but also enrich soil organic matter, creating favorable conditions for microbial activity and soil health. Sustained nutrient recycling via feces can double forage or yield biomass and provide residual benefits over multiple seasons due to the slow release of nutrients from decomposing manure (Schlecht et al., 2004; Rufino et al., 2006).

Finally, nitrogen fluxes in agroecosystems are not limited to goats. The current focus on reproductive females is justified as they have a longer lifespan and play a central role in smallholder herds in SSA. It restricts the scope of inference, as nutrient intake, metabolism, and excretion differ across animal categories (such as young growing and male). Additionally, symbiotic nitrogen fixation by legumes, inputs and outputs of other nutrients (e.g., phosphorus, potassium), and contributions of other livestock species matter to significantly strengthen the ecological relevance of the findings in territorial scale.

Addressing these gaps will improve understanding of nutrient dynamics and functioning of sustainable agroecosystem, for an design of effective integrated crop–livestock strategies based on goat, in SSA.

5.5. Conclusion

This study examined the effects of goat free-grazing farming on nitrogen dynamic within SSA agroecosystems, particularly in a extensive system in western DRC . It also evaluated the impact of alternative management strategies on nitrogen balance and recycling efficiency within agricultural land compartments. The findings confirm that goats are important intermediated agents of nitrogen transfer and redistribution across agroecosystems. This agroecological role of free ranging goat varies sharply among compartments, seasons, and management practices.

In smallholder traditional management practices, nitrogen balances were generally negative, with deficits in Agricultural Land, Rangeland, and Green Hedgerows compartment. This indicates that traditional extensive goat farming fails to sustain efficient nitrogen recycling within this compartment. Nutrient exports through forage consumption outweigh those returns via excreta. Over time, this imbalance risks accelerating soil fertility decline.

Simulated management scenarios revealed pathways for N-balance improvement within ALand. The scenario SC7, for instance, combined longer partial confinement of goats in night shelters, the use of bedding to capture urinary nitrogen, and restricted grazing access, improved nitrogen balances in croplands and enhanced the ecological services of nutrient transfer to ALand, provided by free grazing goats.

Despite this, the persistence of negative balances in the most heavily used compartments suggests that, at the territorial scale, farmers and livestock herders must tie functional relationship as crop residues and animals excreta play complementary roles to secure the success of ICLS.

The free grazing goat farming is definitely recognized as a key nutrient recycler within agroecosystems. However, its effectiveness in transferring these nutrients to croplands within an ICLS framework depends strongly on farmer management strategies.

As soil fertility depends on more than nitrogen alone, we suggest the future research adopt a broader perspective, for instance in integrating other essential nutrients such as phosphorus (P) and potassium (K). In additional, nutrients recycled

through livestock species beyond goats and nitrogen-fixing plants must be taken in account. Such an approach would provide a more holistic understanding of nutrient recycling and transfers within agroecosystems. Improved understanding of nutrient fluxes in extensive livestock systems is critical for designing context-specific integrated crop–livestock strategies that enhance soil fertility, support farmer livelihoods, and strengthen the sustainability of farming systems in sub-Saharan Africa.

5.6. Reference

- Agyarko-Mintah, E., Cowie, A., Singh, B. P., Joseph, S., Van Zwieten, L., Cowie, A., Harden, S., & Smillie, R. (2017). Biochar increases nitrogen retention and lowers greenhouse gas emissions when added to composting poultry litter. *Waste Management*, 61, 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.027>
- Akinsoyinu, A. O., Mba, A. U., & Olubajo, F. O. (1977). Studies on milk yield and composition of the West African dwarf goat in Nigeria. *Journal of Dairy Research*, 44(1), 57-62. <https://doi.org/10.1017/S0022029900019920>
- Altieri, M. A. (2002). Agroecology : The science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93(1-3), 1-24. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00085-3)
- Altieri, M. A., & Anderson, M. K. (1986). An ecological basis for the development of alternative agricultural systems for small farmers in the Third World. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1(1), 30-38. <https://doi.org/10.1017/S0889189300000771>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2008). Scaling up Agroecological Approaches for Food Sovereignty in Latin America. *Development*, 51(4), 472-480. <https://doi.org/10.1057/dev.2008.68>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). Agroecology : Challenges and opportunities for farming in the Anthropocene. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 47(3), 204-215. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v47i3.2281>
- Audouin, E., Odru, M., Masse, D., Dorégo, G. S., Delaunay, V., Lecomte, P., & Vayssières, J. (2024). A methodology based on territorial metabolism analysis to assess the multi-criteria sustainability of African village terroirs with contrasted crop-livestock systems. *Agricultural Systems*, 213, 103781. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103781>
- Augustine, D. J., McNaughton, S. J., & Frank, D. A. (2003). Feedbacks between soil nutrients and large herbivores in a managed savanna ecosystem. *Ecological Applications*, 13(5), 1325-1337. <https://doi.org/10.1890/02-5283>
- Barbieri, P., Starck, T., Voisin, A.-S., & Nesme, T. (2023). Biological nitrogen fixation of legumes crops under organic farming as driven by cropping management : A review. *Agricultural Systems*, 205, 103579. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103579>

- Battheu-Noirfalise, C., Mertens, A., Soyeurt, H., Stilmant, D., Froidmont, E., & Beckers, Y. (2024). Influence of crop-livestock integration on direct and indirect contributions of beef systems to food security. *Agricultural Systems*, 220, 104067. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104067>
- Bellanger, Q., Beline, F., Wilfart, A., Vergely, F., Maillard, G., Evenat, Y., Bize, N., & Harchaoui, S. (2025). Exploring nitrogen-flow networks and energy performance of contrasting organic farms. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 130(1), 111-127. <https://doi.org/10.1007/s10705-024-10384-3>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>
- Boval, M., Angeon, V., & Rudel, T. (2017). Tropical grasslands : A pivotal place for a more multi-functional agriculture. *Ambio*, 46(1), 48–56. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0806-5>
- Cao, Y., Wang, X., Liu, L., Velthof, G. L., Misselbrook, T., Bai, Z., & Ma, L. (2020). Acidification of manure reduces gaseous emissions and nutrient losses from subsequent composting process. *Journal of Environmental Management*, 264, 110454. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110454>
- Chen, S., & Chen, B. (2015). Urban energy consumption : Different insights from energy flow analysis, input–output analysis and ecological network analysis. *Applied Energy*, 138, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.055>
- Daniel M. Komwihangilo. (2012). Situational analysis of smallholder goat production and marketing in Central Tanzania point towards the establishment of farmers' groups. *Journal of Agricultural Extension and Rural Development*, 4(12). <https://doi.org/10.5897/JAERD12.033>
- Devineau, J. (1999). Rôle du bétail dans le cycle culture-jachère en région soudanienne : La dissémination d'espèces végétales colonisatrices d'espaces ouverts (Bondoukuy, sud-ouest du Burkina Faso). *Revue d'Écologie (La Terre et La Vie)*, 54(2), 97-121. <https://doi.org/10.3406/rev.1999.2281>
- Diarisso, T., Corbeels, M., Andrieu, N., Djamen, 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. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9679-4>

- Dosseh, H. K., Ahozonlin, M. C., & Dossa, L. H. (2021). Comparison of some zootechnical performances of local and Red Maradi goats reared under smallholder production systems in the Sudanian zone of Benin. *Veterinary and Animal Science*, 14, 100210. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2021.100210>
- Durant, D., Farruggia, A., & Tricheur, A. (2021). Le roseau commun (*Phragmites australis*) : Un capital naturel utilisé en litière pour le logement des vaches allaitantes. *BASE*, 4, 223-235. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.19164>
- Faber-Langendoen, D. (2020). Tropical, Temperate, and Mediterranean Grasslands of the World. *Encyclopedia of the World's Biomes*, 424-433. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12093-7>
- Fath, B. D., & Scharler, U. M. (2019). Systems Ecology : Ecological Network Analysis. In *Encyclopedia of Ecology* (p. 643-652). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11171-6>
- Gac, A., Béline, F., Bioteau, T., & Maguet, K. (2007). A French inventory of gaseous emissions (CH₄, N₂O, NH₃) from livestock manure management using a mass-flow approach. *Livestock Science*, 112(3), 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.09.006>
- Gasigwa Sabimana, R., Baenyi Simon, P., & Kizungu Vumilia, R. (2018). Paramètres de reproduction et de dynamique de population de la chèvre locale de Mbanza-Ngungu en République démocratique du Congo. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 70(3), 93-97. <https://doi.org/10.19182/remvt.31522>
- Gliessman, S. R., Garcia, R. E., & Amador, M. A. (1981). The ecological basis for the application of traditional agricultural technology in the management of tropical agro-ecosystems. *Agro-Ecosystems*, 7(3), 173-185. [https://doi.org/10.1016/0304-3746\(81\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0304-3746(81)90001-9)
- Gliessman, S. R., Putnam, H., & Cohen, R. (2017). Agroecology and Participatory Knowledge Production and Exchange as a Basis for Food System Change : The Case of the Community Agroecology Network. In A. Wezel, *Agroecological Practices for Sustainable Agriculture* (p. 201-228). World Scientific (Europe). https://doi.org/10.1142/9781786343062_0008
- Grillot, M., Guerrin, F., Gaudou, B., Masse, D., & Vayssières, J. (2018a). Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model. *Environmental Modelling & Software*, 107, 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.003>
- Grillot, M., Vayssières, J., & Masse, D. (2018b). Agent-based modelling as a time machine to assess nutrient cycling reorganization during past agrarian

- transitions in West Africa. *Agricultural Systems*, 164, 133-151.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.04.008>
- Haileslassie, A., Priess, J. A., Veldkamp, E., & Lesschen, J. P. (2007). Nutrient flows and balances at the field and farm scale: Exploring effects of land-use strategies and access to resources. *Agricultural Systems*, 94(2), 459-470.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.11.013>
- Herrero, M., Mason-D'Croz, D., Thornton, P. K., Fanzo, J., Rushton, J., Godde, C., Bellows, A., De Groot, A., Palmer, J., Chang, J., Van Zanten, H., Wieland, B., DeClerck, F., Nordhagen, S., Beal, T., Gonzalez, C., & Gill, M. (2023). Livestock and Sustainable Food Systems: Status, Trends, and Priority Actions. In J. Von Braun, K. Afsana, L. O. Fresco, & M. H. A. Hassan (Éds.), *Science and Innovations for Food Systems Transformation* (p. 375-399). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15703-5_20
- Huruba, R., Mlambo, T., Mundy, P. J., Sebata, A., & MacFadyen, D. N. (2018). Short duration overnight cattle kraaling in natural rangelands: Implications for grass composition, quality, above ground biomass, species diversity and basal cover. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 257, 144-151.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.004>
- Jouven, M., Stark, F., & Moulin, C-H. (2022). Agroécologie, élevage et changement Climatique. Comment l'élevage européen peut-il agir sur les leviers de l'agroécologie pour faire face au changement climatique? *La revue scientifique Viandes & Produits Carnés*. Référence de l'article: VPC-2022-3825.
- Kay, M., & Wobbrock, J. (2016). ARTool: 0.10.0 (Version v0.10.0) [Logiciel]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.44586>
- Lagadec, S., Landrain, B., Landrain, P., & Ramonet, Y. (2013). Emissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre en engraissement de porcs sur litière.
- Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, L., Cubasch, U., Perlwitz, J., & Roeckner, E. (1993). The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Climate Research*, 3, 177-193.
<https://doi.org/10.3354/cr003177>
- Mansouri, H., Paige, R. L., & Surles, J. G. (2004). Aligned Rank Transform Techniques for Analysis of Variance and Multiple Comparisons. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 33(9), 2217-2232.
<https://doi.org/10.1081/STA-200026599>

- Marín, D., Martino, G. D., Guenni, O., & Guédez, Y. (2001). Biomasse et productivité de la strate herbacée des savanes de l'Etat de Guarico (Venezuela).
- Mba, A. U., Boyo, B. S., & Oyenuga, V. A. (1975). Studies on the milk composition of West African dwarf, Red Sokoto and Saanen goats at different stages of lactation: I. Total solids, butterfat, solids-not-fat, protein, lactose and energy contents of milk. *Journal of Dairy Research*, 42(2), 217-226. <https://doi.org/10.1017/S0022029900015259>
- Morand-Fehr, P. (2005). Recent developments in goat nutrition and application: A review. *Small Ruminant Research*, 60(1-2), 25-43. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.06.004>
- Ndona, A., Kambashi, B., Beckers, Y., Moulin, C.-H., & Bindelle, J. (2024). Contribution of traditional goat farming systems to the sustainable intensification of smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: The example of the western part of the Democratic Republic of Congo. *Farming System*, 2(2), 100079. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100079>
- Ndona, A., Kikufi, A., Lutete, E., Kambashi, B., Moulin, C.-H., Beckers, Y., & Bindelle, J. (2025). Identification and evaluation of agroecosystem compartments as forage sources for free-ranging goats in smallholder farming systems of western Democratic Republic of Congo. *Veterinary and Animal Science*, 30, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2025.100524>
- Nnadi, P. A., Kamalu, T. N., & Onah, D. N. (2007). Effect of dietary protein supplementation on performance of West African Dwarf (WAD) does during pregnancy and lactation. *Small Ruminant Research*, 71(1-3), 200-204. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2006.06.007>
- Odoemelam VU, Ahamefule FO, Ibeawuchi JA, Nwachukwu EN, Etuk IF (2013) Milk yield and composition of West Africa Dwarf (WAD) does fed Bambara nut meal based diets. *Nig J Anim Sci* 15:134–141
- Okafor, P., Ogbu, C., & NdofoFoleng, H. (2016). Reproductive and Early Growth Traits of Intensively Reared West African Dwarf (WAD) Kids in a Humid Tropical Environment. *International Journal of Livestock Research*, 6(2), 53. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20151026073012>
- Omotosho, B. O., Bemji, M. N., Bamisile, K., Ozoje, M. O., Wheto, M., Lawal, A. M., Oluwatosin, B. O., Sowande, O. S., James, I. J., & Osinowo, O. A. (2020). Comparative study of growth patterns of Kalahari Red goats and West African dwarf goats reared in Southwest Nigeria. *Nigerian Journal of*

- Animal Production, 47(5), 213-226.
<https://doi.org/10.51791/njap.v47i5.1334>
- Philippe, F.-X., & Nicks, B. (2015). Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 199, 10-25.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.015>
- Piezer, K., Petit-Boix, A., Sanjuan-Delmás, D., Briese, E., Celik, I., Rieradevall, J., Gabarrell, X., Josa, A., & Apul, D. (2019). Ecological network analysis of growing tomatoes in an urban rooftop greenhouse. *Science of The Total Environment*, 651, 1495-1504.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.293>
- Prell, J., & Poole, P. (2006). Metabolic changes of rhizobia in legume nodules. *Trends in Microbiology*, 14(4), 161-168.
<https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.02.005>
- 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(2-3), 143-170. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(96\)00009-1](https://doi.org/10.1016/0308-521X(96)00009-1)
- 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(3), 229-247.
<https://doi.org/10.1007/s10705-008-9239-2>
- Rufino, M. C., Rowe, E. C., Delve, R. J., & Giller, K. E. (2006). Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(4), 261-282.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.028>
- Schlecht, E., Hiernaux, P., Achard, F., & Turner, M. D. (2004). Livestock related nutrient budgets within village territories in western Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68(3), 199-211.
<https://doi.org/10.1023/B:FRES.0000019453.19364.70>
- Schlecht, E., Hiernaux, P., Kadaouré, I., Hülsebusch, C., & Mahler, F. (2006). A spatio-temporal analysis of forage availability and grazing and excretion behaviour of herded and free grazing cattle, sheep and goats in Western Niger. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113(1-4), 226-242.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.09.008>
- Schuster, M. Z., Harrison, S. K., De Moraes, A., Sulc, R. M., Carvalho, P. C. F., Lang, C. R., Anghinoni, I., Lustosa, S. B. C., & Gastal, F. (2018). Effects of crop rotation and sheep grazing management on the seedbank and emerged weed flora under a no-tillage integrated crop-livestock system.

- The Journal of Agricultural Science, 156(6), 810-820.
<https://doi.org/10.1017/S0021859618000813>
- Silanikove, N. (2000). The physiological basis of adaptation in goats to harsh environments. *Small Ruminant Research*, 35(3), 181-193.
[https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(99\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(99)00096-6)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.004>
- 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(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x>
- Steinmetz, L., Veysset, P., Benoit, M., & Dumont, B. (2021). Ecological network analysis to link interactions between system components and performances in multispecies livestock farms. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(3), 42. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00696-x>
- Tedonkeng Pamo, E., Fonteh, F. A., Tendonkeng, F., Kana, J. R., Boukila, B., Djaga, P. J., & Fomewang, G. (2006). Influence of supplementary feeding with multipurpose leguminous tree leaves on kid growth and milk production in the West African dwarf goat. *Small Ruminant Research*, 63(1-2), 142-149.
<https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.02.011>
- Wasso, D. S., Akilimali, J. I., Patrick, B., & Bajope, J. B. (2019). Élevage caprin : Situation actuelle, défis et impact socioéconomique sur la population du territoire de Walungu, République Démocratique du Congo. *Journal of Applied Biosciences*, 129(1), 13050. <https://doi.org/10.4314/jab.v129i1.8>
- Wolde, D. T., & Tamir, B. (2016). Organic Livestock Farming and the Scenario in the Developing Countries : Opportunities and Challenges.
- Xia, C., & Chen, B. (2020). Urban land-carbon nexus based on ecological network analysis. *Applied Energy*, 276, 115465.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115465>

Chapitre 6

Discussion générale

6.1. Introduction

La croissance démographique et l'augmentation de la demande alimentaire intensifient la pression sur les agroécosystèmes, avec pour conséquences majeures la dégradation des sols et l'érosion de la biodiversité (Foley et al., 2011; Barnosky et al., 2012; Bourban, 2019). En Afrique subsaharienne (ASS), où dominent les exploitations agricoles et pastorales extensives faiblement pourvus en intrants externes faute de capitaux, la production dépend fortement de l'état des écosystèmes et des services qu'ils fournissent (Callo-Concha et al., 2013; Orina et al., 2024). La préservation de la productivité des savanes et d'autres écosystèmes exploités est donc une condition centrale de la durabilité des moyens d'existence et de l'approvisionnement alimentaire (Dworczyk & Burkhard, 2021).

Par ailleurs, dans les exploitations familiales en ASS, la rareté des intrants, la variabilité climatique et la fragmentation foncière imposent des stratégies de production capables de maintenir la fertilité, sécuriser l'alimentation et stabiliser les revenus. Les systèmes de productions intégrés culture-élevage (IAE) répondent à cette contrainte en organisant des flux de biomasse et de nutriments entre les animaux et les plantes (résidus → animaux → fumier → champs), ce qui soutient l'intensification écologique par les services écologiques que ce système intégré fournit, comme par exemple le recyclage des nutriments, la santé des sols et la résilience des agroécosystèmes (Struik & Kuyper, 2017; Tiftonell & Giller, 2013; Valbuena et al., 2012 ; Bloor et al., 2012).

Dans ce contexte, l'IAE apparaît au sein d'un agroécosystème comme une stratégie efficace de recyclage des nutriments, de réduction de la dépendance du système aux intrants extérieurs et de renforcement de sa résilience face aux aléas climatiques (Bonaudo et al., 2014; Grillot, Vayssières, et al., 2018; Rufino et al., 2006, 2009; Stark et al., 2016, 2018). Cette efficacité repose notamment sur la valorisation des déjections animales comme fertilisants et celle des résidus des cultures et/ou des jachères comme sources d'aliments pour le bétail.

Dans de nombreux milieux ruraux en ASS, la chèvre constitue l'espèce la plus élevée parmi les petits ruminants, en raison de sa tolérance aux environnements marginaux et aux fourrages de faible qualité, ainsi qu'à la faible nécessité d'un capital financier pour débiter son élevage (Alexandre et al., 2012; Missohou et al., 2016 ; Nair et al., 2021). Si les travaux antérieurs se sont surtout concentrés sur sa reproduction, sa santé, sa nutrition et ses produits (Dubeuf, 2011), la présente thèse a ciblé son rôle agroécologique, notamment la capacité des élevages extensifs à mobiliser et à transférer les nutriments en général, en particulier l'azote, entre les différents compartiments de l'agroécosystème en général, et plus particulièrement le

transfert des nutriments dans les terres agricoles, afin d'évaluer son potentiel dans un système IAE.

Pour ce faire, cette thèse est structurée pour répondre aux questions relatives: (i) aux variantes d'élevage traditionnel des caprins et leurs caractéristiques; (ii) à l'identification de différents compartiments de l'agroécosystème exploités; (iii) aux interactions de ces compartiments avec les chèvres à l'échelle de l'exploitation et du village; (iv) à la nature et l'intensité des flux de nutriments entre ces compartiments, assurés par les chèvres; et (v) à la variabilité saisonnière de ces flux.

Trois études complémentaires conduites en milieu paysan à l'ouest de la RDC ont permis de répondre à ces questions. **La première** (Ndona et al., 2024; chap. 3) a décrit les variantes d'élevage et a montré que le pâturage libre est la variante majoritaire, justifiant son suivi approfondi dans les deux études suivantes.

La deuxième (Ndona et al., 2025; chap. 4) a cartographié les compartiments de l'agroécosystème exploités par les chèvres et a quantifié leurs contributions à l'ingestion de matière sèche (DMI), révélant la dépendance structurelle des élevages de chèvres en pâturage libre, aux ressources locales.

La troisième (Ndona et al. In press ; chap. 5) a proposé un modèle conceptuel des flux d'azote. A partir ce dernier, elle a permis d'estimer les quantités d'azote exportées via les DMI et restituées via les déjections, pour y dégager le bilan dans les compartiments exploités. Enfin, elle a permis d'évaluer l'impact de scénarios de gestion sur le bilan de N dans les compartiments « terres cultivées ».

L'ensemble des résultats montre que les chèvres exploitent efficacement une mosaïque de compartiments (Savanes naturelles, champs cultivés, jachères, haies, résidus) et une diversité d'espèces fourragères qu'elle abrite, y compris des biomasses peu valorisées par l'humain, comme source de nutriments. Ensuite, ces chèvres restituent la fraction non digérée, sous forme de fèces et d'urine (Silanikove, 2000; Schlecht et al., 2006). Dans les conditions de climat tropical humide caractérisé par une longue saison des pluies (Aw4), la productivité spontanée et la diversité végétale fournissent une base fourragère substantielle, (Marín et al., 2001; Augustine et al., 2003) limitant ainsi le recours aux ressources alimentaires extérieurs, pour les petits ruminants comme les chèvres.

Cette thèse a montré que certaines pratiques d'intensification écologique sont déjà présentes chez une partie importante des paysans, car la première étude a révélé qu'environ 50% d'entre eux, utilisaient les résidus des cultures pour nourrir les chèvres et leurs déjections pour améliorer la fertilité des champs. Ces pratiques d'intensification agroécologique matérialisent cette logique de recyclage des nutriments dans un système IAE (Vall et al., 2012; Stark et al., 2016, 2018).

Les trois études réalisées pour cette thèse démontrent suffisamment qu'en plus de leur rôle économique initialement reconnu (trésorerie, sécurité alimentaire et épargne sur pied pour les paysans), les chèvres jouent également le rôle écologique de grande importance en recyclant les nutriments au sein de l'agroécosystème, de manière directe ou indirecte. Cette multi-fonction est déterminante en agriculture familiale extensive comme mécanisme d'adaptation pour une production durable sans apports extérieurs en intrants (Thornton et al., 2018).

Ainsi, l'hypothèse centrale de cette thèse est confirmée: « les chèvres en pâturage libre constituent un vecteur de mobilisation et de transfert de nutriments au sein de l'agroécosystème ». Cependant, l'efficacité agronomique et économique de ce transfert dépend des itinéraires techniques de conduite du troupeau et de gestion des déjections, ainsi que de la structure spatiale des compartiments. Les scénarios simulés dans le chapitre 5 soulignent l'intérêt de ces itinéraires techniques et l'influence de la structure spatiale des compartiments, dans l'optimisation de la récupération de N issue des chèvres et son orientation vers les terres cultivées, où il est le plus limitant, pour un système IAE efficace.

6.2. Structure spatiale, caractérisation et fonctionnement des agroécosystèmes exploités

6.2.1. Structure spatiale et caractérisation

Un agroécosystème fonctionne selon une logique où sa structure spatiale et les interactions qui s'ensuivent, déterminent les flux de matière, d'énergie et de nutriments en son sein; une approche systémique d'analyse de flux est donc pertinente pour évaluer la dynamique de N dans les différents compartiments (Borcard et al., 2004; Tiftonell, 2023). Dans cette thèse, la structure a été décrite par la diversité de compartiments de l'agroécosystème, leurs étendues et leur agencement; le fonctionnement a été analysé via leurs interactions avec la composante « élevage caprin ».

Dans les quatre sites d'étude, la fragmentation apparaît comme un trait majeur du paysage de l'agroécosystème. En effet, dans 97 % des cas, les paysans exploitent plusieurs parcelles (3 ± 1), souvent de petite taille (< 1 ha dans > 70 % des cas) et parfois distantes jusqu'à 5 km les unes des autres. Cette fragmentation est cohérente avec des observations dans des paysages agricoles des milieux ruraux en Afrique subsaharienne et ailleurs (Ciaian et al., 2018; Ntihinyurwa & De Vries, 2020; Ndip

et al., 2023; Gorgan & Hartvigsen, 2022; Tanrıvermiş et al., 2024) où les terres sont affectées à une diversité de spéculations.

La cartographie par drone (chap. 4) met en évidence une mosaïque de compartiments très hétérogène à l'échelle du village (SHDI 0,94–1,19), avec 24 à 54 îlots paysagers par hectare. Les compartiments identifiés et exploités par les chèvres sont: les terres cultivées, les savanes/herbages naturels, les haies vives et les espaces dénudés à résidus/déchets ménagers. Ces compartiments sont inégalement exploités et répartis au sein de l'agroécosystème.

Cette mosaïque reflète l'intensité d'anthropisation liée à la diversification des activités rurales (agriculture, élevage, apiculture, pisciculture), typique des exploitations familiales en RDC (Molinario et al., 2017) ou ailleurs (Ciaian et al., 2018; Ntihinyurwa & De Vries, 2020; Gorgan & Hartvigsen, 2022; Tanrıvermiş et al., 2024), souvent associée au besoin de sécurité alimentaire et à la résilience économique des ménages ruraux (Ferraton & Touzard, 2009 ; Davis et al., 2014 ; Epule & Bryant, 2016 ; Jean-Denis et al., 2014 ; Ndip et al., 2023).

Par ailleurs, le rôle des ruminants comme vecteurs dans le transfert des nutriments entre les compartiments de l'écosystème (Schlecht et al., 2004, 2006; Rufino et al., 2006; Augustine et al., 2003, Diarisso et al., 2015), et plus particulièrement celui des chèvres dans le cadre de cette thèse, est plausible et démontré par (i) les pratiques paysannes (collecte de résidus des cultures pour l'alimentation du bétail et usage du fumier pour fertiliser les champs, voir chap. 3) et (ii) la géolocalisation des chèvres dans les compartiments exploités (chap. 4) et le modèle conceptuel des flux de N entre les compartiments de l'agroécosystème et l'évaluation de leur bilan en azote (chap. 5).

Cependant, il est important de signaler que l'apiculture et la pisciculture comme compartiments à part entière de l'agroécosystème, n'apparaissent pas comme éléments structuraux et fonctionnels à l'issue de la cartographie dans la deuxième étude (chap. 4), par leur faible occurrence (voir première étude, chap. 3) ou leur localisation (étangs en bas-fonds plus éloignés), hors périmètre effectivement exploité par les chèvres.

6.2.2. A l'échelle de la parcelle: fragmentation, typologie d'élevage et alimentation

A l'échelle de la parcelle d'habitation, la coexistence (figure 6.1 a et b) des jardins de case, enclos et élevages de la bassecour produit une fragmentation interne typique des exploitations agricoles familiales dans les milieux ruraux (Ferraton & Touzard, 2009; Jean-Denis et al., 2014). Dans ces configurations, deux variantes d'élevage

sont particulièrement compatibles avec un système IAE à l'échelle des parcelles, à savoir: (1) l'élevage des chèvres en enclos (14% des cas observés) et (2) élevage des chèvres attachées à la corde (14 % des cas, chap. 3).

Elles présentent un avantage majeur pour un système IAE: la proximité physique entre le compartiment animal et végétal, facilite la collecte des déjections et la valorisation des résidus. Cet avantage est surtout lié à la réduction de la pénibilité du transport car les activités de production sont spatialement regroupées dans un seul site d'exploitation (Landais & Lhoste, 1993 ; Latruffe et al., 2016 ; Moraine et al., 2019 ; Kuyah et al., 2021 ; Grillot et al., 2018 ; Stark et al., 2018).

Ces variantes comportent néanmoins un coût. En effet, en limitant l'accès à la diversité des compartiments et des espèces fourragères, ces variantes d'élevage à l'échelle de la parcelle rendent les chèvres plus dépendantes des choix et du travail de récolte/transport fourrager par l'éleveur, avec un risque de ne pas couvrir le besoin de l'animal en DMI. Cette situation peut éventuellement, constituer une contrainte pour l'agrandissement du troupeau de chèvres (Romney et al., 1996).

Une piste de solution à cette contrainte pourrait être le changement de la structure de l'agroécosystème, comme par exemple l'extension spatiale des compartiments «haies vives». En effet, l'augmentation du potentiel fourrager des haies vives, par enrichissement en ligneux et graminées pérennes de haute valeur, pourrait permettre d'accroître la disponibilité annuelle de la biomasse fourragère et de réduire non seulement la pression sur les terres cultivées (Zampaligré et al., 2013 ; Van Kernebeek et al., 2016 ; Ouédraogo et al., 2021), mais aussi et surtout, la problématique de la compétition entre les animaux et les humains pour les ressources alimentaires (Battheu-Noirfalise et al., 2024).

Les haies vives peuvent aussi limiter l'accès des animaux aux cultures et réduire les conflits d'usage des terres entre cultivateurs et éleveurs (Barrière & Barrière, 2002; Azalou et al., 2023), tout en renforçant la multifonctionnalité de ces espèces ligneuses fourragères (ressource mellifère, conservation de biodiversité) (Bisiaux et al., 2012 ; Blake & Nicholson, 2004).

Enfin, les choix cultureux peuvent aussi renforcer la synergie entre l'agriculture et l'élevage et l'intérêt de la chèvre dans un système IAE à l'échelle d'une parcelle, en privilégiant par exemple des cultures dont les résidus sont consommés par les caprins (ex. manioc, patate douce, amarante, bananier, papayer), plutôt que des cultures peu consommées.



a. Illustration fragmentation parcelles site de Kikola



b. Illustration fragmentation parcelles site de Ngeba

Figure 6-1. a et b. Illustrations de fragmentation de l'agroécosystème à l'échelle des parcelles

6.2.3. A l'échelle du village/territoire: fragmentation, pâturage libre et alimentation

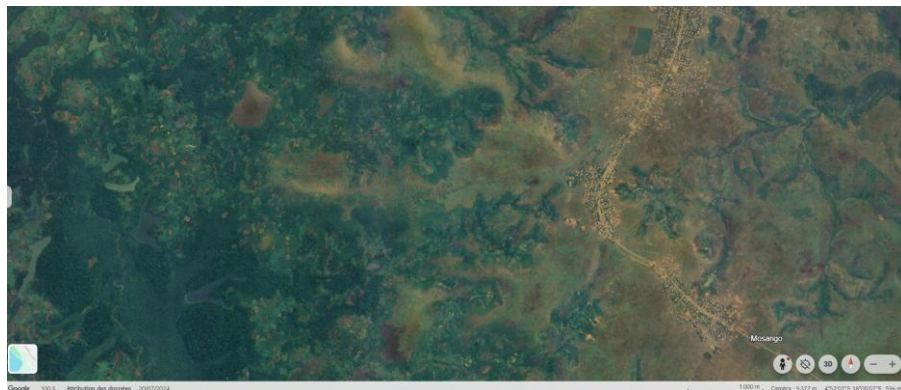
A l'échelle du village (figure 6.2 a, b, c et d des 4 sites, obtenue à l'aide de Google Earth), les mêmes compartiments dominent, mais leurs unités spatiales sont beaucoup plus vastes comparativement à celles à l'échelle d'une parcelle (savanes, champs vivriers, jachères, cours des parcelles), rendant le pâturage libre plus fonctionnel et plus intéressant dans la mobilisation d'une diversité de ressources fourragères (chap 4) et la dynamique des nutriments, dont l'azote (chap 5) (Diarisso et al., 2015). La mosaïque offre une diversité et une quantité de biomasse suffisantes pour couvrir le DMI sans intrants externes, contrairement à l'échelle parcellaire.

Les résultats du chap. 4 montrent qu'à l'échelle du territoire, les chèvres expriment pleinement leur comportement sélectif et leur capacité à exploiter des ressources marginales, y compris ligneux et arbustes, particulièrement en saison sèche (Alexandre et al., 2012; Missohou et al., 2016 ; Nair et al., 2021). Cette plasticité dans les conditions alimentaires difficiles, élargit le spectre des espèces ingérées, et contribue encore plus à accroître l'importance des chèvres dans un système IAE.

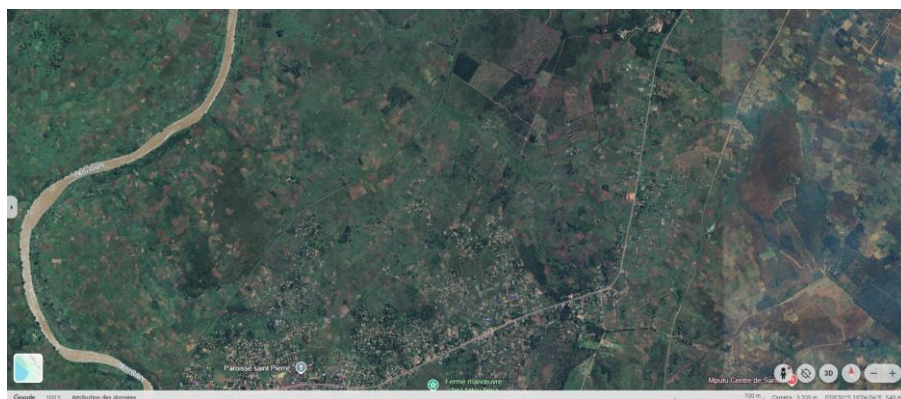
La consommation jusqu'à 57 espèces différentes (dont 17% des graminées et 9% des légumineuses) traduit la richesse floristique locale et la capacité d'ingestion de rations très diversifiées, ce qui influence la composition des déjections et donc les restitutions de nutriments (Farruggia et al., 2008; Rufino et al., 2006; Piñeiro-Vázquez et al., 2017; Wang et al., 2018). Les terres cultivées et les savanes, sont les compartiments les plus diversifiés, fournissant ensemble 70 % du DMI des chèvres. Cette situation explique aussi pourquoi ces deux compartiments subissent la plus grande pression d'exportation de matière sèche et des nutriments.



a. Vue aérienne du site Masamuna



b. Vue aérienne du site Mosango



c. Vue aérienne du site Kikola



d. Vue aérienne du site Ngeba

Figure 6-2. Illustrations de fragmentation de l'agroécosystème à l'échelle du territoire (a= Masamuna, b= Mosango, c= Kikola et d= Ngeba)

Cependant, bien qu'avantageux pour l'alimentation des chèvres en pâturage libre, la fragmentation et surtout l'éloignement entre zones d'élevage (abris/enclos) et champs (parfois > 2,5 km) constituent un frein majeur à l'intégration des flux (chap. 3), du fait de la pénibilité du transport des déjections et des résidus (Haileslassie et al., 2007). Cette contrainte logistique s'ajoute aux tensions foncières et aux conflits d'usage des terres fréquemment rencontrés entre agriculteurs et éleveurs, lorsque les animaux accèdent aux parcelles cultivées et causent de dégâts (Barrière & Barrière, 2002; Diarisso et al., 2015 ; Azalou et al., 2023). Dans ces conditions, renforcer le rôle des haies vives apparaît comme un levier technique et stratégique de gestion, permettant le contrôle d'accès des chèvres dans les champs cultivés, la disponibilité des ressources fourragères, et la stabilisation des interactions d'un système IAE à l'échelle du territoire.

Enfin, la valorisation de résidus et déchets dans les cours, marchés, abords d'infrastructures, etc., présente encore un intérêt écologique évident en élevage des caprins (Baenyi Simon et al., 2021). En effet, les chèvres exploitent et valorisent mieux ces ressources marginales et non concurrentes de l'alimentation humaine, contribuant ainsi au nettoyage de végétations rudérales et à la réduction de la pression sur les champs cultivés (Lamming, 2001 ; Van Zanten et al., 2016 ; Cook, 2017 ; Yayota & Doi, 2020 ; Singh et al., 2024).

6.3. Elevage des caprins en pâturage libre et flux d'azote dans un agroécosystème fragmenté

L'azote est un des éléments nutritifs limitants majeurs pour la production végétale et la qualité des fourrages (LeBauer & Treseder, 2008). Dans les systèmes d'élevage extensifs en pâturage libre, l'essentiel de l'azote ingéré provient des savanes/herbages et des terres cultivées, principales sources de DMI (Huyghe, 2003; Farruggia et al., 2008, Baumont et al., 2012). Les chèvres jouent alors un rôle de redistribution spatiale du N via leurs déjections. Cette redistribution est structurellement hétérogène; elle dépend des parcours, des temps de repos, des préférences alimentaires, de la saison et des pratiques de conduite d'élevage et de collecte des déjections.

Plusieurs études antérieures sur les herbivores confirment leur rôle dans la redistribution des nutriments et le maintien de fonctions du sol (Hedde, 2018 ; Diarisso et al., 2015), tout en rappelant les risques environnementaux en cas de concentrations excessives et de mauvaise gestion des déjections (Augustine et al., 2003; Augustine & Frank, 2001). Les pollutions azotées par exemple, sont surtout associées aux systèmes intensifs, riches en apports protéiques et fortes densités

animales (Bourgeois, 2012; Opio et al., 2011; Grossi et al., 2019). Cette situation très différente du contexte de cette thèse où dans le système d'élevage extensif des chèvres, les apports protéiniques sont quasi inexistantes.

6.3.1. Dans les conditions habituelles des pratiques d'élevage des paysans (SC0)

En conditions usuelles, la dépendance aux ressources locales implique une forte exploitation des savanes et terres cultivées (> 70 % du DMI). Les restitutions de N via les déjections n'y compensent pas les exportations via le DMI, d'où des bilans de N négatifs dans ces compartiments (chap. 5). À l'inverse, le compartiment RSA (certains espaces de repos dans des cours, zones dénudées, abris informels) affiche dans l'ensemble, des bilans de N positifs du fait que des déjections des chèvres y sont déposées fréquemment en temps de repos (Schlecht et al., 2004; 2006; Diarisso et al., 2015 ; Huruba et al., 2018). Ces dépôts des déjections non valorisés constituent une perte d'opportunité agronomique car ils ne sont pas collectés, et encore moins utilisés par les plantes.

Ainsi donc, dans ces conditions habituelles d'élevage extensif, sans stratégie de gestion des troupeaux des chèvres et de leur temps de repos, surtout dans les compartiments dépourvus de végétation (RSA) où les déjections y déposées constituent des pertes de N (Schlecht et al., 2006), le pâturage libre des caprins restera un mécanisme peu efficace, pour le transfert des nutriments dont N vers les terres cultivées. Il pourrait à la longue, accentuer progressivement l'épuisement ou l'appauvrissement des compartiments « terres agricoles et les savanes naturelles », étant donné qu'ils sont les plus pâturés et exploités.

6.3.2. Dans les conditions des pratiques améliorées (de CS1-SC7)

Par ailleurs, la gestion améliorée des troupeaux des chèvres élevées en pâturage libre, ainsi qu'une bonne stratégie de collecte et de gestion des déjections animales (de CS1 à CS7, chap 5) offriraient une opportunité réaliste d'augmenter la quantité d'azote récupérable de ces déjections afin de la restituer par épandage dans les terres cultivées et y améliorer le bilan de N.

Ceci permettrait non seulement d'accroître le processus d'intensification agroécologique entre les chèvres et les terres cultivées, mais aussi et surtout le

transfert des nutriments ou mieux, de fertilité des zones de savane, vers les terres agricoles où l'azote est censé être plus utile et limitant pour les productions végétales.

Les simulations réalisées dans cette étude montrent qu'une intensification agroécologique est possible avec des ajustements techniquement simples, organisés autour de ces trois leviers :

1. **Augmentation de temps de rétention** dans les abris/enclos de nuit (SC1–SC2) pour concentrer et collecter davantage de déjections ;
2. **Réduction des prélèvements dans les champs en culture** (SC4) en limitant l'accès des animaux, afin d'améliorer le bilan d'azote dans les compartiments « terres cultivées »;
3. **Introduction/application de la litière dans les abris/enclos de nuit** (SC3) pour capter l'azote urinaire et limiter les pertes par volatilisation et infiltration.

Les scénarios combinés (SC5-SC7) permettent de maximiser ces effets positifs sur le bilan de N, alors que SC6-SC7 offrent les bilans les plus favorables pour les compartiments « terres cultivées », en rendant les flux plus directionnels (savanes = source d'ingestion; abri = site d'accumulation et terres cultivées = compartiment bénéficiaire). Les résultats de ces scénarios positionnent les flux et bilans d'azote comme des indicateurs pertinents de performance d'intégration des chèvres dans un ICLS à l'échelle du territoire.

Par ailleurs, les chèvres en pâturage libre ne sont pas intrinsèquement « incompatibles » avec un système IAE à l'échelle du village. L'efficacité de leur contribution dans un système IAE dépend de la capacité des paysans à transformer une redistribution diffuse des déjections en un transfert orienté, en appliquant des itinéraires techniques et stratégies de gestion des troupeaux adaptés et une organisation spatiale cohérente des exploitations. Cela nécessiterait donc, un renforcement des capacités des paysans par diverses formations en gestion des troupeaux, en dispositifs de collecte des déjections, en mise en place des haies vives fonctionnelles, etc., dans une perspective compatible avec un système IAE à l'échelle d'un territoire.

6.4. Durabilité agronomique, environnementale et économique de l'élevage caprin en IAE

En termes de durabilité agronomique, la dispersion des déjections et les bilans d'azote observés dans les différents compartiments de l'agroécosystème indiquent que les chèvres redistribuent spatialement l'azote de manière incontrôlée et très contrastée. Les compartiments fortement exploités (terres agricoles et savanes naturelles) sont des sources majeures d'azote ingéré et de sa déplétion (Schlecht et al., 2006; Grillot et al., 2018b), tandis que le compartiment RSA (les espaces dénudés comme les cours des parcelles, des vérandas d'habitation, des ruelles où les résidus/déchets sont disponibles et où les animaux passent beaucoup plus de temps de repos) deviennent des puits de dépôts des déjections plus que d'autres, car les chèvres y passent aussi beaucoup plus de temps, sans trop s'y ressourcer en DMI.

Les scénarios des pratiques améliorées contribuent certes à réduire les pertes de N, mais ne garantissent pas un bilan global nul ou positif étant donné que les apports extérieurs demeurent quasi inexistantes, et que les transferts horizontaux vers les terres cultivées ne permettront pas d'y compenser les quantités de N prélevées (Grillot et al., 2018b).

Cette lecture est cohérente avec les faibles restitutions de l'azote dans les compartiments de l'agroécosystème, souvent rapportées en systèmes extensifs africains (Powell et al., 1996; Schlecht et al., 2004; Diarisso et al., 2015). En conséquence, impliquer les caprins en pâturage libre dans un système IAE apparaît surtout comme un mécanisme de réallocation des nutriments dont le N, qu'une stratégie d'intensification agroécologique, tant que les itinéraires techniques efficaces de son amélioration ne sont pas mis en oeuvre.

L'intensification agroécologique doit de ce fait être optimisée par l'intervention humaine, avec un minimum de contrôle de la mobilité des troupeaux et la gestion efficace de leur déjections, comme stratégie d'amélioration d'un système IAE impliquant les caprins. L'allongement du temps de confinement, l'usage de litière et la restriction d'accès aux champs (selon les scénarios de gestion améliorée) redirigent l'azote vers les terres cultivées et peuvent renverser localement le bilan d'azote de ce compartiment (Schlecht et al., 2004; Diarisso et al., 2015; Lagadec et al., 2013; Durant et al., 2021). Ces stratégies permettent ainsi une meilleure connexion élevage-agriculture pour limiter le recours aux intrants extérieurs. Elles convergent avec les principes agroécologiques de gestion des flux de biomasse et des nutriments, fondement du processus d'intensification écologique d'un agroécosystème (Tittonell & Giller, 2013; Valbuena et al., 2012; Struik et al., 2017; Stark et al., 2018).

Pour ce qui est de la durabilité environnementale d'un système IAE impliquant les caprins, les pertes rapides d'azote des déjections et plus spécialement des urines par volatilisation suite à une mauvaise gestion des fumiers, peuvent limiter fortement le bénéfice agronomique (Diarisso et al., 2015) et amplifier l'empreinte environnementale de ce système d'élevage, en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre (Nasiru et al., 2014; Maltais-Landry et al., 2018; Chen et al., 2023). Les dispositifs de litière et une gestion plus contrôlée de dépôt urinaire/fécal du bétail, sont des leviers concrets et faisables pour y remédier, malgré le supplément de travail que cela requiert (Lagadec et al., 2013; Durant et al., 2021).

6.5. Leviers de gestion et effets attendus sur l'IAE-caprin dans un agroécosystème fragmenté à l'échelle du territoire.

La fragmentation accroît la diversité floristique et l'hétérogénéité du paysage de l'agroécosystème. Elle est avantageuse car elle peut favoriser une base fourragère riche et diversifiée, susceptible de renforcer dans une certaine mesure, la résilience dans la disponibilité de la biomasse fourragère des chèvres.

Cependant, cette fragmentation pourrait rendre coûteux le transfert contrôlé des nutriments via les résidus des cultures et les déjections animales, si les sites d'élevage et de culture sont éloignés de plus de 2,5 km les uns des autres. Dans le cas contraire (distance <2,5km), la fragmentation associée aux différents scénarios de gestion améliorée (de CS1 à CS7), permet de mieux recycler l'azote, et de l'orienter vers les compartiments terres cultivées, permettant ainsi l'amélioration du bilan de N et la réduction des apports extérieurs en intrants. Les leviers de gestions et leurs effets attendus dans un système IAE impliquant les chèvres, sont présentés de façon synthétique dans le tableau 6.1.

Tableau 6-1. Leviers de gestion et effets attendus sur l'IAE basée sur les caprins

Levier	Effet principal	Bénéfice agronomique /Economique	Risque/contrainte	Condition de réussite
Prolongement confinement dans l'enclos/abri de nuit	Faciliter et augmenter la collecte de déjections, augmenter la quantité N à restituer dans les terres cultivées	Amélioration de la fertilité et la santé des sols, réduction des apports extérieurs en fertilisants	Plus de travail Risques sanitaires Bien-être animal	Enclos adaptés, gestion hygiénique
Litière dans l'enclos/ l'abri de nuit	Réduire les pertes d'N urinaire, augmenter la quantité de N à restituer dans les terres cultivées	Amélioration du bien-être et santé animal, Fumier mieux valorisé amélioration de la fertilité et la santé des sols, réduction des apports extérieurs en fertilisants	Plus de travail, indisponibilité de biomasse pour la litière	disponibilité de matériel local, simplification du protocole de mise en œuvre, Aménagement d'un sol imperméable
Gestion des résidus (collecte/stockage)	Transfert biomasse végétale et de N vers les animaux	Réduction de coût d'alimentation, transformation de la biomasse en fumier animal	Concurrence d'usages (combustible, paillage)	facilité de transport et de stockage
Enrichissement des haies vives en espèces fourragères pérennes	Augmentation de la disponibilité et la quantité de la biomasse fourragère en toutes les saisons, Apport d'N par fixation symbiotique si les espèces sont des légumineuses	Moins de pression sur champs cultivés, soutien les animaux pendant le prolongement de confinement et rareté des fourrages	Plus de travail Temps d'installation long	Choix des espèces adaptées
Restriction et contrôle d'accès aux terres cultivées	Réduction des dégâts aux cultures, réduction des conflits	Limitation des exportations de N, sécurisation des cultures	Plus de travail Hypothétique succès, si le dispositif n'est pas bien mis en place	Établissement des Haies/clôtures résistantes et infranchissables

Au regard de ce qui précède, l'interprétation de ces résultats doit tenir compte de certaines limites liées au dispositif d'échantillonnage mis en œuvre. Le suivi des déplacements des chèvres dans l'agroécosystème, de leur comportement alimentaire dans les compartiments de l'agroécosystème exploités et la dynamique des flux d'azote qui s'en suit, ont été réalisés sur douze chèvres adultes dans quatre villages, durant trois jours d'observation par saison.

Bien que ce protocole expérimental ait permis de caractériser avec précision les comportements des chèvres au pâturage, les contributions des compartiments à leur régime alimentaire et les transferts de nutriments au sein de l'agroécosystème, la taille relativement réduite de l'échantillon (trois chèvres par site) limite la représentativité statistique des résultats, sur l'ensemble des élevages des caprins en pâturage libre de la RDC.

Les comportements individuels des animaux peuvent varier selon l'âge, le statut physiologique, la taille du troupeau, les pratiques d'élevage ou encore les conditions environnementales locales. Ces résultats reposent donc exclusivement sur des femelles adultes, et excluent les éventuelles différences comportementales et nutritionnelles pouvant exister chez les mâles reproducteurs ou les jeunes animaux.

De même, les observations réalisées sur une période relativement courte de trois jours, ne permettent pas de capturer l'ensemble de la variabilité temporelle susceptible d'affecter la disponibilité des ressources fourragères, l'étendue des déplacements des animaux et les dynamiques de recyclage des nutriments en général et de l'azote en particulier.

En conséquence, les flux et bilans d'azote estimés doivent être considérés comme représentatifs des conditions observées plutôt que comme des valeurs directement extrapolables à l'ensemble des systèmes d'élevage caprin de la RDC. En plus, les apports d'azote d'autres sources comme la fixation symbiotique par les légumineuses et l'azote apporté par les orages n'ont pas été considérés, alors qu'ils contribuent potentiellement comme sources supplémentaires d'azote dans les terres agricoles.

Néanmoins, malgré ces limitations, la cohérence des tendances observées entre villages et saisons, ainsi que la convergence des résultats issus des analyses

spatiales, alimentaires et biogéochimiques, confèrent une robustesse suffisante aux mécanismes de transfert d'azote par les chèvres, mis en évidence dans cette étude.

Elle fournit plus de compréhension sur le processus fonctionnel gouvernant les interactions entre caprins, compartiments de l'agroécosystème exploité et flux de nutriments, bien meilleure que produire des estimations statistiques exhaustives à l'échelle régionale ou nationale.

Pour cette raison, des travaux futurs reposant sur un plus grand nombre d'animaux, de villages et de cycles saisonniers permettraient toutefois de renforcer la capacité de généralisation des résultats de cette étude et de mieux quantifier la variabilité des rôles que les caprins en pâturage libre jouent dans le recyclage de l'azote et l'intensification agroécologique au sein des agroécosystèmes tropicaux.

Chapitre 7

Conclusions générales et perspectives

Dans un contexte de dégradation des sols, de faible accès aux intrants externes et de fragmentation de l'agroécosystème, cette thèse a démontré que l'élevage extensif caprin en pâturage libre constitue un vecteur effectif de mobilisation et de redistribution ou de transfert des nutriments dont l'azote, à l'échelle du territoire.

Cependant, ce transfert ou cette restitution de N ne garantit pas l'efficacité du processus d'intensification agroécologique dans un système IAE impliquant les caprins, sans que soient respectés des itinéraires techniques adéquats.

Les bilans d'azote observés dans les compartiments de l'agroécosystème exploités par les chèvres indiquent que, dans les pratiques habituelles des élevages en pâturage libre, les compartiments les plus exploités (savanes et terres cultivées) peuvent rester déficitaires en N, car les restitutions de N n'y compensent pas les exportations lorsque les déjections sont dispersées et non collectées.

L'efficacité du recyclage et des restitutions des nutriments, dépendent donc fortement (i) des stratégies de gestion du troupeau (temps de stabulation, temps à passer dans des aires de repos), (ii) de la gestion des déjections (collecte, litière, stockage/épandage), et (iii) de la structure spatiale (distances entre parcelles d'élevage et celles des cultures, contrôle d'accès des caprins dans les champs cultivés, la qualité et l'étendue des haies vives).

Les scénarios simulés suggèrent qu'une intensification agroécologique dans un système IAE basé sur les chèvres peut être obtenue en combinant l'augmentation du temps de confinement dans l'abri de nuit, la mise en place de litière pour capter l'urine et son azote, la limitation de l'ingestion fourragère dans les champs cultivés, et le renforcement des haies vives non seulement comme un compartiment fourrager, mais aussi de régulation d'accès des animaux dans les terres cultivées.

Ces résultats doivent toutefois être validés en conditions réelles d'élevage des chèvres en pâturage libre, avec des évaluations techniques, économiques et sociales (travail supplémentaire, acceptabilité, coûts d'aménagement, gouvernance locale dans l'accès aux terres, etc.) de manière participative avec les populations locales.

Enfin, cette thèse ouvre des perspectives de recherche-action dans la quantification plus approfondie des flux, la co-conception des itinéraires techniques intégrant les particularités socio-économiques et environnementales de chaque milieu. Dans un contexte de transition agroécologique en Afrique subsaharienne, la compréhension et l'optimisation de ces systèmes d'élevage traditionnels offrent des bases opérationnelles pour concevoir des stratégies de gestion durable des agroécosystèmes aussi bien à l'échelle de la parcelle que du territoire.

References

- Agrisud (2010). *L'agroécologie en pratiques : Guide* (édition 2010). Libourne, France : Agrisud International.
- Alexandre, G., Arquet, R., Fleury, J., Troupé, W., Boval, M., Archimède, H., Mahieu, M., & Mandonnet, N. (2012). Systèmes d'élevage caprins en zone tropicale : Analyse des fonctions et des performances. *INRAE Productions Animales*, 25(3), 305-316. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2012.25.3.3218>
- Altieri, M. A. (1999). Applying Agroecology to Enhance the Productivity of Peasant Farming Systems in Latin America. *Environment, Development and Sustainability*, 1(3), 197-217. <https://doi.org/10.1023/A:1010078923050>
- Altieri, M. A. (2013). *L'agroécologie*. Condé-sur-Noireau, France : Éditions Charles Corlet, p16–17.
- Altieri, M. A., & Anderson, M. K. (1986). An ecological basis for the development of alternative agricultural systems for small farmers in the Third World. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1(1), 30-38. <https://doi.org/10.1017/S0889189300000771>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). Agroecology : Challenges and opportunities for farming in the Anthropocene. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 47(3), 204-215. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v47i3.2281>
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Dinelli, G., & Negri, L. (2024). Towards an agroecological approach to crop health : Reducing pest incidence through synergies between plant diversity and soil microbial ecology. *Npj Sustainable Agriculture*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.1038/s44264-024-00016-2>
- Audouin, E., Odru, M., Masse, D., Dorégo, G. S., Delaunay, V., Lecomte, P., & Vayssières, J. (2024). A methodology based on territorial metabolism analysis to assess the multi-criteria sustainability of African village terroirs with contrasted crop-livestock systems. *Agricultural Systems*, 213, 103781. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103781>

- Aufrere, J. (1982). Etude de la prévision de la digestibilité des fourrages par une méthode enzymatique. *Annales de Zootechnie*, 31(2), 111-130. <https://doi.org/10.1051/animres:19820202>
- Augustine, D. J., & Frank, D. A. (2001). EFFECTS OF MIGRATORY GRAZERS ON SPATIAL HETEROGENEITY OF SOIL NITROGEN PROPERTIES IN A GRASSLAND ECOSYSTEM. *Ecology*, 82(11), 3149-3162. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082%255B3149:EOMGOS%255D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082%255B3149:EOMGOS%255D2.0.CO;2)
- Augustine, D. J., McNaughton, S. J., & Frank, D. A. (2003). FEEDBACKS BETWEEN SOIL NUTRIENTS AND LARGE HERBIVORES IN A MANAGED SAVANNA ECOSYSTEM. *Ecological Applications*, 13(5), 1325-1337. <https://doi.org/10.1890/02-5283>
- Azalou, M., Assani, A.S., Worogo, H.S.S. et al. Analysis of the interrelationships of stakeholders involved in the management of transhumance in southern Benin. *Trop Anim Health Prod* 55, 108 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03533-3>
- Baenyi Simon, P., Owino Joseph, J., Ochieng, J. W., Tiambo, C. K., Tarekegn, G. M., Machuka, E. M., Kabange, D., Musale, K., Ciza, A. M., Kizungu, R. V., & Pelle, R. (2021). Typology, management and smallholder farmer-preferred traits for selection of indigenous goats (*Capra hisrcus*) in three agro-ecological zones in the Democratic Republic of Congo. *Journal of Applied Animal Research*, 49(1), 423-430. <https://doi.org/10.1080/09712119.2021.1995393>
- Barnosky, A. D., Hadly, E. A., Bascompte, J., Berlow, E. L., Brown, J. H., Fortelius, M., Getz, W. M., Harte, J., Hastings, A., Marquet, P. A., Martinez, N. D., Mooers, A., Roopnarine, P., Vermeij, G., Williams, J. W., Gillespie, R., Kitzes, J., Marshall, C., Matzke, N., ... Smith, A. B. (2012). Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature*, 486(7401), 52-58. <https://doi.org/10.1038/nature11018>
- Battheu-Noirfalise, C., Mertens, A., Soyeurt, H., Stilmant, D., Froidmont, E., & Beckers, Y. (2024). Influence of crop-livestock integration on direct and indirect contributions of beef systems to food security. *Agricultural Systems*, 220, 104067. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104067>

- Baumont, R., Delaby, L., Michaud, A. A. (2012). Services fourragers des prairies permanentes: production d'herbe et valeur alimentaire pour les ruminants. Journées de Printemps de l'AFPP, Apr 2012, Paris, France. HAL Id: hal-01210368, <https://hal.science/hal-01210368v1>
- Bénagabou, O. I., Blanchard, M., Bougouma Yaméogo, V. M. C., 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'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 70(2), 31-41. <https://doi.org/10.19182/remvt.31479>
- Bisiaux, F., Peltier, R., & Muliele, J.-C. (2012). MAMPU, sur les plateaux Batéké, en R.D. Congo, le projet qui réconcilie Agroforesterie et production de bois-énergie. In É. Roose, H. Duchaufour, & G. De Noni (Éds.), *Lutte antiérosive*. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.13775>
- Blake, R. W., & Nicholson, C. F. (2004). Livestock, land use change, and environmental outcomes in the developing world. *BSAP Occasional Publication*, 33, 133-153. <https://doi.org/10.1017/S1463981500041716>
- Blanchard, M., Coulibaly, D., Sissoko, F., & Pocard-Chappuis, R. (2012). Contribution de l'intégration agriculture-élevage à l'intensification écologique des systèmes agrosylvopastoraux : Le cas du Mali-Sud.
- Bloor, J. M. G., Jay-Robert, P., Le Morvan, A., & Fleurance, G. (2012). Déjections des herbivores domestiques au pâturage : Caractéristiques et rôle dans le fonctionnement des prairies. *INRAE Productions Animales*, 25(1), 45-56. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2012.25.1.3196>
- Bommarco, R., Kleijn, D., & Potts, S. G. (2013). Ecological intensification : Harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4), 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.012>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>
- Borcard, D., Legendre, P., Avois-Jacquet, C., & Tuomisto, H. (2004). DISSECTING THE SPATIAL STRUCTURE OF ECOLOGICAL DATA AT MULTIPLE SCALES. *Ecology*, 85(7), 1826-1832. <https://doi.org/10.1890/03-3111>

- Bourban, M. (2019). Croissance démographique et changement climatique : Repenser nos politiques dans le cadre des limites planétaires: La Pensée écologique, N° 3(1), 19-37. <https://doi.org/10.3917/lpe.003.0019>
- Bourgeois, L. (2012). A Discounted Threat : Environmental Impacts of the Livestock Industry. *Earth Common Journal*, 2(1). <https://doi.org/10.31542/j.ecj.56>
- Boval, M., Angeon, V., & Rudel, T. (2017). Tropical grasslands : A pivotal place for a more multi-functional agriculture. *Ambio*, 46(1), 48-56. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0806-5>
- Callo-Concha, D., Gaiser, T., Webber, H., Tischbein, B., Müller, M., & Ewert, F. (2013). Farming in the West African Sudan Savanna : Insights in the context of climate change. *African Journal of Agricultural Research*, 8(38), 4693-4705. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7153>
- Cassman, K.G. (1999) Ecological Intensification of Cereal Production Systems: Yield Potential, Soil Quality, and Precision Agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96, 5952-5959. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.96.11.5952>
- Chapin, F. S., Torn, M. S., & Tateno, M. (1996). Principles of Ecosystem Sustainability. *The American Naturalist*, 148(6), 1016-1037. <https://doi.org/10.1086/285969>
- Chaudhary, S., Shrestha, A. K., Rai, S., Acharya, D. K., Subedi, S., & Rai, R. (2023). Agroecology integrates science, practice, movement, and future food systems. *Journal of Multidisciplinary Sciences*, 5(2), 39-60. <https://doi.org/10.33888/jms.2023.525>
- Ciaccia, C., La Torre, A., Ferlito, F., Testani, E., Battaglia, V., Salvati, L., & Rocuzzo, G. (2019). Agroecological Practices and Agrobiodiversity : A Case Study on Organic Orange in Southern Italy. *Agronomy*, 9(2), 85. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020085>
- Ciaian, P., Guri, F., Rajcaniova, M., Drabik, D., & Paloma, S. G. Y. (2018). Land fragmentation and production diversification : A case study from rural Albania. *Land Use Policy*, 76, 589-599. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.02.039>
- Claveirole, C. (2016). La transition agroécologique : Défis et enjeux. *Journal Officiel de la République Française*, (NOR : CESL1100013X), 105.

- Colli L, Milanesi M, Talenti A, Bertolini F, Chen M, Crisà A, Daly KG, Del Corvo M, Guldbbrandtsen B, Lenstra JA, Rosen BD, Vajana E, Catillo G, Joost S, Nicolazzi EL, Rochat E, Rothschild MF, Servin B, Sonstegard TS, Steri R, Van Tassell CP, Ajmone-Marsan P, Crepaldi P, Stella A; AdaptMap Consortium. Genome-wide SNP profiling of worldwide goat populations reveals strong partitioning of diversity and highlights post-domestication migration routes. *Genet Sel Evol.* 2018 Nov 19;50(1):58. doi: 10.1186/s12711-018-0422-x. PMID: 30449284; PMCID: PMC6240949.
- Conway, G.R., (1987). The properties of agro ecosystems. *Agric Syst.* 24, 95-117.
- Cook, J. 2017. Guide for Using Goats to Manage Weeds in Urban Public Spaces. Masters of Agriculture Project Colorado State University June 2017.
- Cui, Z., Zhang, H., Chen, X., Zhang, C., Ma, W., Huang, C., Zhang, W., Mi, G., Miao, Y., Li, X., Gao, Q., Yang, J., Wang, Z., Ye, Y., Guo, S., Lu, J., Huang, J., Lv, S., Sun, Y., ... Dou, Z. (2018). Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature*, 555(7696), 363-366. <https://doi.org/10.1038/nature25785>
- Daily, G. C. (Ed.). 1997. *Nature's services. Societal dependence on natural ecosystems.* Island Press, Washington, DC.
- Davis, B., Di Giuseppe, S., & Zezza, A. (2014). *Income Diversification Patterns in Rural Sub-Saharan Africa : Reassessing the Evidence.* World Bank Group, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-7108>
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393-408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Diarisso, T., Corbeels, M., Andrieu, N., Djamen, 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. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9679-4>
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., & Tittonell, P. (2011). Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy : Revisiting methods, concepts and knowledge. *European*

- Journal of Agronomy, 34(4), 197-210.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.006>
- Dubeuf, J.-P. (2011). The social and environmental challenges faced by goat and small livestock local activities : Present contribution of research–development and stakes for the future. *Small Ruminant Research*, 98(1-3), 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.03.008>
- Dumont, A. M., Vanloqueren, G., Stassart, P. M., & Baret, P. V. (2016). Clarifying the socioeconomic dimensions of agroecology : Between principles and practices. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(1), 24-47. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1089967>
- Dumont, A. M., Wartenberg, A. C., & Baret, P. V. (2021). Bridging the gap between the agroecological ideal and its implementation into practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(3), 32. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00666-3>
- Durant, D., Farruggia, A., & Tricheur, A. (2021). Le roseau commun (*Phragmites australis*) : Un capital naturel utilisé en litière pour le logement des vaches allaitantes. *BASE*, 4, 223-235. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.19164>
- Dworczyk, C., & Burkhard, B. (2021). Conceptualising the demand for ecosystem services – an adapted spatial-structural approach. *One Ecosystem*, 6, e65966. <https://doi.org/10.3897/oneeco.6.e65966>
- Edoh, J. H., Houndonougbo, F. M., Kouato, O. G., Kindomihou, V., & Babatounde, S. (2023). Typology of goat feeding systems in Benin.
- Epule, T., & Bryant, C. (2016). Small Scale Farmers' Indigenous Agricultural Adaptation Options in the Face of Declining or Stagnant Crop Yields in the Fako and Meme Divisions of Cameroon. *Agriculture*, 6(2), 22. <https://doi.org/10.3390/agriculture6020022>
- Eric Vall, Mahamadou Koutou, Mélanie Blanchard, Kalifa Coulibaly, Mohamadoun A. Diallo, et al.. Intégration agriculture-élevage et intensification écologique dans les systèmes agrosylvopastoraux de l'Ouest du Burkina Faso, province du Tuy. Partenariat, modélisation, expérimentations : quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique ?, Nov 2011, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 12 p. hal-00718613 HAL Id: hal-00718613 <https://hal.science/hal-00718613v1>

- Farruggia, A., Martin, B., Baumont, R., Prache, S., Doreau, M., Hoste, H., & Durand, D. (2008). Quels intérêts de la diversité floristique des prairies permanentes pour les ruminants et les produits animaux? *INRAE Productions Animales*, 21(2), 181-200. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2008.21.2.3391>
- Ferraton, N., & Touzard, I. (2009). *Comprendre l'agriculture familiale*. éditions Quae. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-0340-6>
- Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643-653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Gallardo-López, F., Hernández-Chontal, M. A., Cisneros-Saguilán, P., & Linares-Gabriel, A. (2018). Development of the Concept of Agroecology in Europe : A Review. *Sustainability*, 10(4), 1210. <https://doi.org/10.3390/su10041210>
- Gliessman, S. (2014). Agroecology and Social Transformation. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38(10), 1125-1126. <https://doi.org/10.1080/21683565.2014.951904>
- Gliessman, S. R. (1998). *Agroecology: Ecological Processes in Sustainable Agriculture*. Chelsea, MI: Ann Arbor Press.
- Gliessman, S. R., Garcia, R. E., & Amador, M. A. (1981). The ecological basis for the application of traditional agricultural technology in the management of tropical agro-ecosystems. *Agro-Ecosystems*, 7(3), 173-185. [https://doi.org/10.1016/0304-3746\(81\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0304-3746(81)90001-9)
- Gliessman, S. R., Putnam, H., & Cohen, R. (2017). Agroecology and Participatory Knowledge Production and Exchange as a Basis for Food System Change : The Case of the Community Agroecology Network. In A. Wezel, *Agroecological Practices for Sustainable Agriculture* (p. 201-228). WORLD SCIENTIFIC (EUROPE). https://doi.org/10.1142/9781786343062_0008

- Gomgnimbou, A. P. K., Nacro, H. B., Sanon, O. H., Sieza, I., Kiendrebeogo, T., Sedogo, M. P., & Martinez, J. (2014). Managing animal manures in the Bobo-Dioulasso peri-urban zone (Burkina Faso): Structure of livestock farms, evaluation of their environmental and sanitary impacts, perspectives. *Cahiers Agricultures*, 23(6), 393-402. <https://doi.org/10.1684/agr.2014.0724>
- Gordon, I. J., Prins, H. H. T., & Squire, G. R. (Éds.). (2017). Introduction in Gordon et al. eds, *Food production and nature conservation : Conflicts and solutions*. Routledge. Taylor & Francis. 3-11. <https://doi.org/10.4324/9781315717289>
- Gorgan, M., & Hartvigsen, M. (2022). Development of agricultural land markets in countries in Eastern Europe and Central Asia. *Land Use Policy*, 120, 106257. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106257>
- Grillot, M., Guerrin, F., Gaudou, B., Masse, D., & Vayssières, J. (2018a). Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model. *Environmental Modelling & Software*, 107, 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.003>
- Grillot, M., Vayssières, J., & Masse, D. (2018b). Agent-based modelling as a time machine to assess nutrient cycling reorganization during past agrarian transitions in West Africa. *Agricultural Systems*, 164, 133-151. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.04.008>
- Grossi, G., Goglio, P., Vitali, A., & Williams, A. G. (2019). Livestock and climate change : Impact of livestock on climate and mitigation strategies. *Animal Frontiers*, 9(1), 69-76. <https://doi.org/10.1093/af/vfy034>
- Hailelassie, A., Priess, J. A., Veldkamp, E., & Lesschen, J. P. (2007). Nutrient flows and balances at the field and farm scale : Exploring effects of land-use strategies and access to resources. *Agricultural Systems*, 94(2), 459-470. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.11.013>
- Harrison, K.A., Bardgett, R.D. (2008). Impacts of Grazing and Browsing by Large Herbivores on Soils and Soil Biological Properties. In: Gordon, I.J., Prins, H.H.T. (eds) *The Ecology of Browsing and Grazing*. Ecological Studies, vol 195. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72422-3_8
- Hedde, M. (2018). Indicateurs basés sur la faune des sols : Des outils pour l'agriculture innovante ? <https://doi.org/10.15454/J1HFAR>

- Huruba, R., Mlambo, T., Mundy, P. J., Sebata, A., & MacFadyen, D. N. (2018). Short duration overnight cattle kraaling in natural rangelands : Implications for grass composition, quality, above ground biomass, species diversity and basal cover. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 257, 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.004>
- Huyghe, C. (2003). Les fourrages et la production de protéines. *Fourrages* (2003) 174, 145-162
- Jean-Denis, S., Jean-Pierre, D., Mutel, M., Duchaufour, H., Langlais, C., Fernandes, P., Alphonse, M.-E., & Malézieux, É. (2014). Évolution de la structure d'un système agroforestier en relation avec le cycle de vie familial : Cas du jardin de case en Haïti. *BOIS & FORETS DES TROPIQUES*, 321, 7-20. <https://doi.org/10.19182/bft2014.321.a31213>
- Karume, K., Mondo, J. M., Chuma, G. B., Ibanda, A., Bagula, E. M., Aleke, A. L., Ndjaji, S., Ndusha, B., Ciza, P. A., Cizungu, N. C., Muhindo, D., Egeru, A., Nakayiwa, F. M., Majaliwa, J.-G. M., Mushagalusa, G. N., & Ayagirwe, R. B. B. (2022). Current Practices and Prospects of Climate-Smart Agriculture in Democratic Republic of Congo: A Review. *Land*, 11(10), 1850. <https://doi.org/10.3390/land11101850>
- Kay, M., & Wobbrock, J. (2016). ARTool: 0.10.0 (Version v0.10.0) [Logiciel]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.44586>
- Koutchoro, A. M., Ranaivoson, L., Yaoitcha, A. S., Houessou, L. G., Yemadje, P. L., & Honoré Biaou, S. S. (2025). Forage production in West Africa: Systematic review of advances, challenges, and perspectives for resilient agropastoral systems. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101941. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101941>
- Kowalchuk, G.A. and Stephen, J.R. (2001) Ammonia-Oxidizing Bacteria: A Model for Molecular Microbial Ecology. *Annual Review of Microbiology*, 55, 485-529. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.55.1.485>
- Lagadec, S., Landrain, B., Landrain, P., & Ramonet, Y. (2013). Emissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre en engraissement de porcs sur litière.
- Lamming, L.(2001). ALTERNATIVE WEED STRATEGIES. Successfully Controlling Noxious Weeds with Goats The natural choice that manages weeds and builds soil health. Beyond Pesticides/National Coalition Against the Misuse of Pesticides. *Pesticides and You*. Vol. 21, No. 4, 2001

- Landais, Étienne, & Lhoste, P. (1993). Systèmes d'élevage et transferts de fertilité dans la zone des savanes africaines II Les systèmes de gestion de la fumure animale et leur insertion dans les relations entre l'élevage et l'agriculture. *Cahiers Agricultures*, 2(1), 9–25 (1). Consulté à l'adresse <https://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/view/29769>
- Latruffe, L., Diazabakana, A., Bockstaller, C., Desjeux, Y., Finn, J., Kelly, E., Ryan, M., & Uthes, S. (2016). Measurement of sustainability in agriculture : A review of indicators. *Studies in Agricultural Economics*, 118(3), 123-130. <https://doi.org/10.7896/j.1624>
- LeBauer, D. S., & Treseder, K. K. (2008). NITROGEN LIMITATION OF NET PRIMARY PRODUCTIVITY IN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS IS GLOBALLY DISTRIBUTED. *Ecology*, 89(2), 371-379. <https://doi.org/10.1890/06-2057.1>
- Lemaire, G., de Faccio Carvalho, P. C., Kronberg, S., & Recous, S. (Eds.). (2018). *Agroecosystem diversity: reconciling contemporary agriculture and environmental quality*. Academic press.
- Lemaire, G., Franzluebbers, A., Carvalho, P. C. D. F., & Dedieu, B. (2014). Integrated crop–livestock systems : Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 4-8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>
- Manceron, S., Ben-Ari, T., & Dumas, P. (2014). Feeding proteins to livestock : Global land use and food vs. feed competition. *OCL*, 21(4), D408. <https://doi.org/10.1051/ocl/2014020>
- Mansouri, H., Paige, R. L., & Surles, J. G. (2004). Aligned Rank Transform Techniques for Analysis of Variance and Multiple Comparisons. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 33(9), 2217-2232. <https://doi.org/10.1081/STA-200026599>
- Martinez, J., Mallard, P., Béline, F. Gestion et traitement des déjections animales : éléments du contexte en Europe. Conférence sur l'Impact de l'Elevage sur l'Environnement et le Climat, May 2008, Paris, France. pp.22-26. HAL Id : hal-02590665
- MEA (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC, p. 39-53.

- Mélanie Blanchard, Doubangolo Coulibaly, Alassane Ba, Fagaye Sissoko, René Pocard-Chappuis. Contribution de l'intégration agriculture-élevage à l'intensification écologique des systèmes agrosylvopastoraux : le cas du Mali-Sud. Partenariat, modélisation, expérimentations : quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique ?, Nov 2011, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 12 p. (hal-00718658) <https://hal.science/hal-00718658v1>
- Mertens, A., Battheu-Noirfalise, C., Madrange, P., Mathot, M., Berchoux, A., & Baumont, R. (2025). Évaluer et interpréter l'efficacité d'utilisation des aliments et des terres par les ruminants. *INRAE Productions Animales*, 8464. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2025.38.2.8464>
- Meuret, M., Bartiaux-Thill, N., Bourbouze, A., Rosenberger, S., Vernerey, M., Sourbier, Y., Ninane, V., Trojan, Michèle, Trojan, Marianne, Rouchy, N., & André, J.-F. (1985). Evaluation de la consommation d'un troupeau de chèvres laitières sur parcours forestier—Méthode d'observation directe des coups de dents—Méthode du marqueur oxyde de chrome. *Annales de Zootechnie*, 34(2), 159-180. <https://doi.org/10.1051/animres:19850203>
- Mishra, G., Giri, K., Jangir, A., Vasu, D., & Rodrigo-Comino, J. (2021). Understanding the effect of shifting cultivation practice (slash-burn-cultivation-abandonment) on soil physicochemical properties in the North-eastern Himalayan region. *Investigaciones Geográficas*, (76), 243. <https://doi.org/10.14198/INGEO.17820>
- Missohou, A., Nahimana, G., Ayssiwede, S. B., & Sembene, M. (2016). Elevage caprin en Afrique de l'Ouest : Une synthèse. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 69(1), 3-18. <https://doi.org/10.19182/remvt.31167>
- Mobley, H.L.T., & Hausinger, R.P. (1989). Microbial ureases: significance, regulation and molecular characterization. *Microbiological Reviews*, 53, 85-108.
- Molinario, G., Hansen, M. C., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Stehman, S., Barker, B., & Humber, M. (2017). Quantification of land cover and land use within the rural complex of the Democratic Republic of Congo. *Environmental Research Letters*, 12(10), 104001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8680>

- Moraine, M., Ramonteu, S., Magrini, M.-B., & Philippe Choisis, J. (2019). Typologie de projets de complémentarité culture – élevage à l'échelle du territoire en France : De l'innovation technique à l'innovation territoriale. <https://doi.org/10.15454/MYICHB>
- Musafiri, C. M., Kiboi, M., Macharia, J., Ng'etich, O. K., Kosgei, D. K., Mulianga, B., Okoti, M., & Ngetich, F. K. (2022). Adoption of climate-smart agricultural practices among smallholder farmers in Western Kenya : Do socioeconomic, institutional, and biophysical factors matter? *Heliyon*, 8(1), e08677. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08677>
- Nair, M.R.R., Sejian, V., Silpa, M.V. (2021). Goat as the ideal climate-resilient animal model in tropical environment: revisiting advantages over other livestock species. *Int J Biometeorol* 65, 2229–2240 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02179-w>
- Ndip, F. E., Molua, E. L., Mvodo, M.-E. S., Nkendah, R., Djomo Choumbou, R. F., Tabetando, R., & Akem, N. F. (2023). Farmland Fragmentation, crop diversification and incomes in Cameroon, a Congo Basin country. *Land Use Policy*, 130, 106663. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106663>
- Ndona, A., Kambashi, B., Beckers, Y., Moulin, C.-H., & Bindelle, J. (2024). Contribution of traditional goat farming systems to the sustainable intensification of smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: The example of the western part of the Democratic Republic of Congo. *Farming System*, 2(2), 100079. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100079>
- Ndona, A., Kikufi, A., Lutete, E., Kambashi, B., Moulin, C.-H., Beckers, Y., & Bindelle, J. (2025). Identification and evaluation of agroecosystem compartments as forage sources for free-ranging goats in smallholder farming systems of western Democratic Republic of Congo. *Veterinary and Animal Science*, 30, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2025.100524>
- Ntihinyurwa, P. D., & De Vries, W. T. (2020). Farmland fragmentation and defragmentation nexus : Scoping the causes, impacts, and the conditions determining its management decisions. *Ecological Indicators*, 119, 106828. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106828>
- Opio, C., Gerber, P., & Steinfeld, H. (2011). Livestock and the environment : Addressing the consequences of livestock sector growth. *Advances in*

Animal Biosciences, 2(3), 601-607.
<https://doi.org/10.1017/S204047001100286X>

Orina, P. S., Chepkirui, M., Orina, T., Olala, M., & Oluwole, F. (2024). A Review on Africa's Agricultural Farming Systems and Potential for Transition. *Collective Journal Of Agricultural Sciences*, 01-08.
<https://doi.org/10.70107/collectjagricsci-ART0032>

Ouédraogo, K., Zaré, A., Korbéogo, G., Ouédraogo, O., & Linstädter, A. (2021). Resilience strategies of West African pastoralists in response to scarce forage resources. *Pastoralism*, 11(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s13570-021-00210-8>

Prosser, J.I. (1989). Autotrophic nitrification in bacteria. *Advances in Microbial Physiology*, 30, 125-181. [https://doi.org/10.1016/S0065-2911\(08\)60112-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2911(08)60112-5)

Rahmann, G., Reza Ardakani, M., Bårberi, P., Boehm, H., Canali, S., Chander, M., David, W., Dengel, L., Erisman, J. W., Galvis-Martinez, A. C., Hamm, U., Kahl, J., Köpke, U., Kühne, S., Lee, S. B., Løes, A.-K., Moos, J. H., Neuhof, D., Nuutila, J. T., ... Zanolli, R. (2017). Organic Agriculture 3.0 is innovation with research. *Organic Agriculture*, 7(3), 169-197.
<https://doi.org/10.1007/s13165-016-0171-5>

Rivero, M. J., Evans, A. C. O., Berndt, A., Cartmill, A., Dowsey, A., Farruggia, A., Mignolet, C., Enriquez-Hidalgo, D., Chadwick, D., McCracken, D. I., Busch, D., Pereyra, F., Martin, G. B., Sanford, G. R., Sheridan, H., Wright, I., Brunet, L., Eisler, M. C., Lopez-Villalobos, N., ... Lee, M. R. F. (2021). Taking the steps toward sustainable livestock : Our multidisciplinary global farm platform journey. *Animal Frontiers*, 11(5), 52-58.
<https://doi.org/10.1093/af/vfab048>

Robertson, G. P., & Groffman, P. M. (2015). Nitrogen Transformations. In *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (p. 421-446). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415955-6.00014-1>

Romney, D. L., Sendalo, D. S. C., Owen, E., Mtenga, L. A., Penning, P. D., Mayes, R. W., & Hendy, C. R. C. (1996). Effects of tethering management on feed intake and behaviour of Tanzanian goats. *Small Ruminant Research*, 19(2), 113-120. [https://doi.org/10.1016/0921-4488\(95\)00753-9](https://doi.org/10.1016/0921-4488(95)00753-9)

Rufino, M. C., Rowe, E. C., Delve, R. J., & Giller, K. E. (2006). Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems.

- Agriculture, Ecosystems & Environment, 112(4), 261-282.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.028>
- Rufino, M. C., Tiftonell, P., Reidsma, P., López-Ridaura, S., Hengsdijk, H., Giller, K. E., & Verhagen, A. (2009). 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. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9256-9>
- Ryschawy, J., Joannon, A., & Gibon, A. (2014). Mixed crop-livestock farm : Definitions and research issues. A review. *Cahiers Agricultures*, 23(6), 346-356. <https://doi.org/10.1684/agr.2014.0727>
- Schlecht, E., Hiernaux, P., Achard, F., & Turner, M. D. (2004). Livestock related nutrient budgets within village territories in western Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68(3), 199-211. <https://doi.org/10.1023/B:FRES.0000019453.19364.70>
- Schwarz, G., Vanni, F., Miller, D., Helin, J., Pražan, J., Albanito, F., Fratila, M., Galioto, F., Gava, O., Irvine, K., Landert, J., Quero, A. L., Mayer, A., Monteleone, D., Muller, A., Rööös, E., Smyrniotopoulou, A., Vincent, A., Vlahos, G., & Zilāns, A. (2022). Exploring Sustainability Implications of Transitions to Agroecology : A Transdisciplinary Perspective. *EuroChoices*, 21(3), 37-47. <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12377>
- Silanikove, N. (2000). The physiological basis of adaptation in goats to harsh environments. *Small Ruminant Research*, 35(3), 181-193. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(99\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(99)00096-6)
- Singh, G., Singh, S., Sharma, K., Sharma, L.K., and Kumar, A. (2024). Effect of Goat Rearing on Environment and Rural Prosperity in India. *International Journal of Science, Environment ISSN 2278-3687 (O) and Technology*, Vol. 13, No 6, 2024, 421 – 433
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.004>
- 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(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x>
- Struik, P. C., & Kuyper, T. W. (2017). Sustainable intensification in agriculture : The richer shade of green. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5), 39. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0445-7>
- Tanrıvermiş, Y., Tanrıvermiş, H., & Uisso, A. M. (2024). Assessment of farmland fragmentation and the role of the legal regulations for the prevention of farmland fragmentation in Türkiye. *Land Use Policy*, 145, 107289. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107289>
- Thornton, P. K., Kristjanson, P., Förch, W., Barahona, C., Cramer, L., & Pradhan, S. (2018). Is agricultural adaptation to global change in lower-income countries on track to meet the future food production challenge? *Global Environmental Change*, 52, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.06.003>
- Tilman, D., Cassman, K., Matson, P., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671-677
- Tittonell, P. (2023). Systems Approach : Analysis, Design and Modelling. In P. Tittonell, *A Systems Approach to Agroecology* (p. 43-77). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42939-2_2
- Valbuena, D., Erenstein, O., Homann-Kee Tui, S., Abdoulaye, T., Claessens, L., Duncan, A. J., Gérard, B., Rufino, M. C., Teufel, N., Van Rooyen, A., & Van Wijk, M. T. (2012). Conservation Agriculture in mixed crop–livestock systems : Scoping crop residue trade-offs in Sub-Saharan Africa and South Asia. *Field Crops Research*, 132, 175-184. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.022>
- Vall, E., Koutou, M., Blanchard, M., Coulibaly, K., Diallo, M. A., & Andrieu, N. (2012). Intégration agriculture-élevage et intensification écologique dans les systèmes agrosylvopastoraux de l'Ouest du Burkina Faso, province du Tuy. <https://hal.science/hal-00718613v1>
- Van Kernebeek, H. R. J., Oosting, S. J., Van Ittersum, M. K., Bikker, P., & De Boer, I. J. M. (2016). Saving land to feed a growing population : Consequences for consumption of crop and livestock products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(5), 677-687. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0923-6>

- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Van Zanten, H. H. E., Meerburg, B. G., Bikker, P., Herrero, M., & De Boer, I. J. M. (2016). Opinion paper : The role of livestock in a sustainable diet: a land-use perspective. *Animal*, 10(4), 547-549. <https://doi.org/10.1017/S1751731115002694>
- Vayssières, J., Alary, V., Aubron, C., Corniaux, C., Duteurtre, G., et al.. Évaluation multicritère de l'efficacité pour rendre compte de la multifonctionnalité des systèmes d'élevage au pâturage. Ickowicz Alexandre (ed.); Moulin Charles-Henri (ed.). Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux. *Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses*, Ed. Quae, pp.120-135, 2022, Matière à débattre et décider, 978-2-7592-3485-1. (hal-05179872)
- Wang, J., Wang, D., Li, C., Seastedt, T. R., Liang, C., Wang, L., Sun, W., Liang, M., & Li, Y. (2018). Feces nitrogen release induced by different large herbivores in a dry grassland. *Ecological Applications*, 28(1), 201-211. <https://doi.org/10.1002/eap.1640>
- Washaya, S., & Washaya, D. D. (2023). Benefits, concerns and prospects of using goat manure in sub-Saharan Africa. *Pastoralism*, 13(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s13570-023-00288-2>
- 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(4), 503-515. <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>
- Yayota, M., & Doi, K. (2020). Goat Grazing for Restoring, Managing, and Conserving “Satoyama”, a Unique Socio-Ecological Production Landscape. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 541721. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.541721>
- Zampaligré, N., Dossa, L. H., & Schlecht, E. (2013). Contribution of browse to ruminant nutrition across three agro-ecological zones of Burkina Faso. *Journal of Arid Environments*, 95, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.03.011>