

Faculté des bioingénieurs

L'agroécologie offre-t-elle une solution viable à l'échelle du terroir ?

Analyse détaillée des réservoirs et flux de matières organiques dans la région de l'Atacora au Bénin

Auteurs : François Greiner
Tom Kenda
Promoteur : Prof. Charles Bielders (UCL/ELI/ELIE)
Co-promoteur : Prof. Pierre Defourny (UCL/ELI/ELIE)
Lecteurs : Dr. Kambiré (IRSAT/CNRST)
Prof. Gérard (UM6P/AgBS)

Année Académique : 2021 - 2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : sciences agronomiques

Remerciements

Nous tenons à remercier très chaleureusement,

Notre promoteur, le professeur Charles Bielders, pour nous avoir donné l'opportunité de réaliser ce mémoire. Nous tenons également à le remercier pour son suivi très rapproché du début à la fin du mémoire. Grâce à son expertise en régions tropicales et en agronomie, nous avons reçu des commentaires rigoureux et pertinents et cela nous a grandement aidé dans la réalisation de ce mémoire. Son attitude positive a rendu nos nombreuses réunions agréables. Nous avons bénéficié d'un encadrement dont beaucoup de mémorants rêveraient de bénéficier.

Notre co-promoteur, le professeur Pierre Defourny, pour son accompagnement sur la partie « télédétection » de ce mémoire. Ses nombreux conseils se sont toujours révélés décisifs pour la réalisation de cette partie, et son attitude constructive et passionnée nous a motivé.

Nos deux lecteurs, les professeurs Bruno Gérard et Fabékourè Cédric Kambiré, pour avoir accepté notre invitation à lire et évaluer notre mémoire. Nous sommes ravis et honorés de pouvoir bénéficier d'un regard extérieur à l'UCLouvain.

Victorine Djago, pour son accueil exceptionnel lors de notre séjour au Bénin. Elle a été une excellente guide, avec une force, une ruse et une détermination incroyable, ne perdant jamais son sourire lors des nombreuses difficultés rencontrées sur le terrain. Ce travail aurait été impossible sans son aide et sans sa connaissance du terrain avant, pendant et après notre séjour au Bénin. Merci également de nous avoir fait découvrir ton pays, ta famille et tes amis, toujours avec tant de gentillesse. Namoto mou !

Les nombreuses personnes rencontrées sur notre route au Bénin : les membres d'Eclosio à Natitingou, les professeurs de l'université d'Abomey-Calavi et de Parakou, les agricultrices et agriculteurs qui ont bien voulu répondre à nos questions, ainsi que nos guides et chauffeurs, sans qui nous n'aurions pu explorer les quatre coins de chaque village. Le Pr. Tovihoudji de l'université de Parakou pour ses conseils pertinents. Mathias pour son accueil à Parakou, Arios pour son accueil à Abomey-Calavi et les moments plus festifs passés ensemble, Dieudonné pour les nombreuses visites, et tous les autres béninois qui nous ont offert des souvenirs inoubliables.

Baptiste Delhez, qui s'est occupé de commander les images Pléiades et nous a ensuite fourni des conseils techniques pour le traitement des images (vive OTB).

Nos amis, en particulier les membres du Kap Vert et de l'ULYC, qui nous ont fourni un soutien moral et des moments de repos (ou pas) indispensables.

Nos familles, pour leur soutien sans relâche et leur confiance accordée durant ces cinq années d'études, qui furent intenses en connaissances et en émotions.

Enfin, l'Académie de recherche et d'enseignement supérieur de la Fédération Wallonie-Bruxelles (ARES), pour la bourse octroyée à François dans le cadre de sa politique de Coopération au développement. L'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer (ARSOM) pour la bourse octroyée à Tom avec le fonds Floribert Jurion.

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	iii
Table des figures	vii
Table des tableaux	ix
Liste des acronymes	xii
Introduction	1
I Etat de l’Art	4
1 Concept d’Agroécologie	4
1.1 Historique, Définitions et Principes	4
1.2 Atouts et limitations de l’agroécologie	7
2 L’agriculture familiale en Afrique subsaharienne	11
2.1 Définition et importance	11
2.2 Challenges et opportunités	12
3 Cartographie par télédétection	14
3.1 Systèmes de télédétection	14
3.2 Classification des occupations du sol	15
3.3 Les estimations de biomasse	18
4 Nutriments et gestion de la fertilité des sols	19
4.1 Fertilité des sols en ASS	19
4.2 Azote et phosphore, la controverse	20
4.3 Bilan de nutriments	22
5 Conclusion	27
II Zone d’étude : département de l’Atacora, Bénin	28
1 Localisation	28
2 Topographie	29
3 Climat	29
4 Contexte socio-économique et agriculture	30
5 Village de référence	32
III Matériels et méthodes	33

1	Généralités/Matériels	34
1.1	Logiciels.....	34
1.2	Campagne de terrain	35
2	Cartographie de l'occupation du sol	36
2.1	Images Pléiades.....	36
2.2	Collecte des données de terrain	37
2.3	Masque des nuages	40
2.4	Préparation des données.....	41
2.5	Classifications.....	45
2.6	Evaluation des classifications.....	47
3	Enquêtes auprès des agriculteurs	48
3.1	Méthodologie générale.....	48
3.2	Questionnaire	49
3.3	Analyse des données.....	50
4	Échantillonnage des ressources organiques	53
4.1	Résidus de culture.....	53
4.2	Biomasse herbacée	54
4.3	Biomasse foliaire ligneuse.....	56
5	Bilan de nutriments à l'échelle du terroir	57
5.1	Définition du système	57
5.2	Estimation des termes du bilan	58
5.3	Recyclage des nutriments par le bétail.....	63
5.4	Scénarios de gestion de la fertilité.....	65
IV	Résultats et discussion	67
1	Caractérisation du système agricole	67
1.1	Description de l'échantillon de population	67
1.2	Caractéristiques des exploitations.....	68
1.3	Pratique de fertilisation	70
1.4	Gestion des résidus de culture.....	73
1.5	Discussion sur les caractéristiques du système agricole	74
2	Cartographie de l'occupation du sol	75

2.1	<i>Pansharpening</i>	75
2.2	Masque de nuages	76
2.3	Evaluation des classifications en une étape	77
2.4	Evaluation des classifications hiérarchiques.....	83
2.5	Classification finale	84
2.6	Discussion.....	87
3	Quantification des ressources organiques.....	90
3.1	Produits de récolte.....	90
3.2	Résidus de culture.....	92
3.3	Biomasse herbacée	92
3.4	Biomasse foliaire ligneuse.....	93
3.5	Bilan des ressources organiques valorisables à l'échelle du terroir	94
4	Bilans de nutriments	95
4.1	Résultats des scénarios	95
4.2	Discussion des scénarios et bilans	102
V	Conclusion.....	104
VI	Références bibliographiques	107
VII	Annexes	119
1	Revue de littérature sur la quantification des ressources organiques	119
1.1	Produits de récolte.....	119
1.2	Résidus de culture.....	121
1.3	Biomasse herbacée	122
1.4	Biomasse foliaire ligneuse.....	122
1.5	Tableaux des valeurs d'autres études.....	123
2	Les nutriments.....	124
2.1	Définition et importance des nutriments en agronomie.....	124
2.2	Cycle complet du phosphore et de l'azote	126
3	Formulaire KoBoToolbox pour la collecte de données	127
3.1	Enquêtes pour la quantification des ressources et la caractérisation des exploitations	127
3.2	Points GPS pour la reconnaissance d'image satellite	136

4	Nouvelle nomenclature des sols de la région	137
5	Exemple de table de calcul des fréquences de strate.....	138
6	Aires de validation.....	138
7	Résultats d'enquêtes.....	139
7.1	Description de l'échantillon de population	139
7.2	Nombre d'observation par spéculation et par village	140
7.3	Détails des associations de culture par village	141
7.4	Surface fertilisée par village.....	141
7.5	Comparaison des rendements déclarés aux statistique de la FAO	145
8	Détails supplémentaire sur les bilans de nutriments.....	145
9	Précipitation et NDVI de l'Atacora	148

Table des figures

FIGURE 1 – LES 10 ÉLÉMENTS DE L'AGROÉCOLOGIE ET LEURS INTERACTIONS (FAO, 2018c).	6
FIGURE 2 – SIGNATURES SPECTRALES TYPIQUES DE L'EAU, DU SOL NU, ET DE LA VÉGÉTATION VERTE (SEOS-PROJECT.EU).	17
FIGURE 3 – APPORTS D'AZOTE (A) ET DE PHOSPHORE (B) DES ACTIVITÉS HUMAINES AU SYSTÈME TERRESTRE. LES DONNÉES RELATIVES AUX APPORTS DE N ET DE P PROVIENNENT RESPECTIVEMENT DE HOLLAND ET AL. (2005) ET DE CORDELL ET AL. (2009). LES LIMITES PLANÉTAIRES ANTHROPIQUES DES APPORTS D'ENGRAIS N ET P PROVIENNENT DE STEFFEN ET AL. (2015) ET SPRINGMANN ET AL. (2018). BNF : FIXATION BIOLOGIQUE DE L'AZOTE. LA ZONE VERTE DE LA FIGURE 1B DÉSIGNE LE P PRODUIT À PARTIR DE ROCHES PHOSPHATÉES POUR UN USAGE NON FERTILISANT. (ZHANG ET AL., 2020).....	21
FIGURE 4 – DISTRIBUTIONS SOUS-GLOBALES ET ÉTAT ACTUEL DES VARIABLES DE CONTRÔLE POUR (A) LES FLUX BIOGÉOCHIMIQUES DE P ET (B) LES FLUX BIOGÉOCHIMIQUES DE N. SUR CHAQUE CARTE, LES ZONES VERTES SONT À L'INTÉRIEUR DE LA LIMITE PLANÉTAIRE (SANS DANGER), LES ZONES JAUNES SONT À L'INTÉRIEUR DE LA ZONE D'INCERTITUDE (RISQUE CROISSANT) ET LES ZONES ROUGES SONT AU-DELÀ DE LA ZONE D'INCERTITUDE (RISQUE ÉLEVÉ). LES ZONES GRISSES SONT CELLES OÙ LES ENGRAIS P ET N NE SONT PAS APPLIQUÉS (ADAPTÉ DE STEFFEN ET AL., 2015).	21
FIGURE 5 – SCHÉMA DU BILAN DE NUTRIMENT D'UN SYSTÈME. LES "EXTRANTS PRODUCTIFS" COMPRENNENT LES ÉLÉMENTS NUTRITIFS RÉCOLTÉS ET RETIRÉS DU SYSTÈME, TELS QUE LES CULTURES, LA PAILLE ET LES PRODUITS POUR ANIMAUX, QUI SONT GÉNÉRALEMENT DES PRODUITS DE VALEUR ÉCONOMIQUE (ZHANG ET AL., 2020).....	22
FIGURE 6 – ILLUSTRATION DES ÉCHELLES DE SYSTÈME UTILISÉES POUR QUANTIFIER LES BILANS DE NUTRIMENTS. LA DÉFINITION DES ÉCHELLES DU SYSTÈME EST DÉVELOPPÉE À PARTIR DE LI ET AL (2019). LES ÉCHELLES DU SYSTÈME DÉFINISSENT LES ÉLÉMENTS CLÉS QUI SERONT EXAMINÉS À L'INTÉRIEUR D'UNE LIMITE PHYSIQUE (C'EST-À-DIRE UNE ÉCHELLE SPATIALE). PAR EXEMPLE, DANS UN BASSIN VERSANT, L'ÉVALUATION DU BILAN NUTRITIF PEUT SE CONCENTRER SUR LA PRODUCTION VÉGÉTALE UNIQUEMENT (C'EST-À-DIRE UN TYPE DE SYSTÈME SOL-PLANTE), INCLURE LA PRODUCTION ANIMALE (C'EST-À-DIRE UN SYSTÈME ANIMAL-PLANTE-SOL), OU INCLURE L'ENSEMBLE DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT ALIMENTAIRE (C'EST-À-DIRE UN SYSTÈME AGROALIMENTAIRE), OU TOUTES LES AUTRES ACTIVITÉS HUMAINES QUI INDUISENT DES APPORTS D'AZOTE DANS LE PAYSAGE, COMME LA COMBUSTION DE COMBUSTIBLES FOSSILES (C'EST-À-DIRE UN SYSTÈME PAYSAGER) (ZHANG ET AL., 2020).	23
FIGURE 7 – EXEMPLES DES PRINCIPAUX INTRANTS ET EXTRANTS PRODUCTIFS DES CINQ SYSTÈMES. LES CHIFFRES ENTRE PARENTHÈSES SONT L'ESTIMATION DE CHAQUE TERME BUDGÉTAIRE POUR L'AZOTE À L'ÉCHELLE MONDIALE AVEC L'UNITÉ DE Tg N AN ⁻¹ . "NA" INDIQUE QUE L'ESTIMATION N'EST PAS DISPONIBLE POUR LE TERME BUDGÉTAIRE DANS CET EXEMPLE. LES ESTIMATIONS SONT BASÉES SUR BILLEN ET AL. (2014), AVEC DES MODIFICATIONS MINEURES (ADAPTÉ DE ZHANG ET AL.,2020).	24
FIGURE 8 – LOCALISATION DES SIX VILLAGES DE LA ZONE D'ÉTUDE PAR RAPPORT À L'AFRIQUE, LE BÉNIN, ET L'ATACORA.	28
FIGURE 9 – MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉLÉVATION COUVRANT LES SIX VILLAGES DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	29
FIGURE 10 – PRÉCIPITATIONS ET TEMPÉRATURES MAXIMALES, MOYENNES ET MINIMALES MENSUELLES POUR LE DÉPARTEMENT DE L'ATACORA SUR LA PÉRIODE 1991-2020 (GAUCHE, SOURCE DE DONNÉES : CRU TS V.4.05) ET POUR L'ANNÉE 2021 (DROITE, SOURCE DE DONNÉES : INFOCLIMAT, 2021, GRAPHIQUE PAR GREINER ET KENDA, 2022).....	30
FIGURE 11 – SCHÉMA DE LA MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE DU MÉMOIRE.	33
FIGURE 12 – COLLECTE DES POINTS GPS. 1) PRISE D'UN POINT GPS, 2) TOURNÉE DE TERRAIN EN SUIVANT UN GUIDE QUI CONNAIT LA LOCALISATION DES TYPES DE SOLS ET DES CULTURES, ET LES DANGERS, 3) APPRENTISSAGE DE L'ENCODAGE DES DONNÉES À UN STAGIAIRE, 4) LE GPS GARMIN GPSMAP 62STC, 5) LA SAISON DES PLUIES RENDANT LES DÉPLACEMENTS IMPOSSIBLES, 6) LA PRÉSENCE DE SERPENTS (VIPÈRE ICI) RENDANT LES DÉPLACEMENTS EN DEHORS DES CHEMINS PÉRILLEUX.	38
FIGURE 13 – IMAGE DU VILLAGE DE GONRI, MONTRANT LES POINTS GPS ET LES ROI. POUR FACILITER LA VISUALISATION, L'ENTIÈRETÉ DU VILLAGE N'EST PAS VISIBLE. LES ROI D'ENTRAÎNEMENT SONT LES POLYGONES CRÉÉS POUR ENTRAÎNER L'ALGORITHME DE CLASSIFICATION. LES ROI DE VALIDATION SONT LES POLYGONES CRÉÉS POUR VALIDER LA CLASSIFICATION ET CRÉER UNE MATRICE DE CONFUSION. ELLES SONT SOUVENT SITUÉES PRÈS DES ZONES VISITÉES (POINTS GPS).	39
FIGURE 14 – WORKFLOW POUR LA CRÉATION DU MASQUE DE NUAGES.	40
FIGURE 15 – WORKFLOW GLOBAL DE LA MÉTHODOLOGIE DE CLASSIFICATION EN UNE ÉTAPE ET HIÉRARCHIQUE. LA FLÈCHE EN POINTILLÉS INDIQUE QUE LA VALIDATION PERMET D'AMÉLIORER LES DATASETS, AFIN DE TROUVER LE PLUS PERFORMANT.	47
FIGURE 16 – ESSAI DU QUESTIONNAIRE AVEC JEANETTE SINASANMOU (1) ET ENQUÊTE AVEC L'AIDE D'UN INTERPRÈTE (2).....	49

FIGURE 17 – LES ÉTAPES DE L'ÉCHANTILLONNAGE DES CULTURES : (1) RÉCOLTE POUR UNE PARCELLE DE MAÏS (LA LIGNE JAUNE AU SOL DÉLIMITE LE QUADRAT DE 4M ²), (2) RÉCOLTE POUR UNE PLANCHE DE PIMENT, (3) LE MOYEN DE TRANSPORT POUR RAMENER LES QUADRATS DE MAÏS RÉCOLTÉS AU VILLAGE, (4) LES ENFANTS AIDANT À TRIER LA RÉCOLTE PAR TYPE DE RÉSIDU (FEUILLES, TIGES ET SPATHES ICI), (5) LE SÉCHAGE DES RÉSIDUS DANS LES SACS AU SOLEIL, ET (6) LA PESÉE DE LA MATIÈRE SÈCHE.....	54
FIGURE 18 – LES ÉTAPES DE L'ÉCHANTILLONNAGE DE LA BIOMASSE HERBACÉE : (1) REPÉRAGE D'UNE ZONE DE PÂTURAGE, (2) OBSERVATION DE LA STRATE DE CHAQUE QUADRAT DE 1 M ² LE LONG DU TRANSECT DE 30 M, (3) RÉCOLTE INTÉGRALE DE LA BIOMASSE HERBACÉE D'UN QUADRAT, ET (4) SÉCHAGE ET PESÉE DES SOUS-ÉCHANTILLONS.....	55
FIGURE 19 – REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES FLUX ET BILANS DE NUTRIMENTS POUR L'AGRICULTURE AFRICAINE À L'ÉCHELLE DU TERROIR. LES FLÈCHES REPRÉSENTENT LES FLUX. LES ENCADRÉS REPRÉSENTENT LES APPORTS (INPUT) ET LES PERTES (OUTPUT) DE NUTRIMENTS PAR RAPPORT AUX CHAMPS. LE RECYCLAGE DES NUTRIMENTS A LIEU PRINCIPALEMENT PAR LE BÉTAIL À PARTIR DES RÉSIDUS DE CULTURE ET DES FOURRAGES DES SAVANES. CETTE BIOMASSE PEUT AUSSI SE DÉCOMPOSER SUR PLACE.	57
FIGURE 20 – TENEURS EN ARGILE (GAUCHE) ET CARBONE ORGANIQUE (DROITE) DES 15 PREMIERS CM DU SOL DES VILLAGES DE LA ZONE D'ÉTUDE (D'APRÈS LES DONNÉES MESURÉES PAR VICTORINE DJAGO).	62
FIGURE 21 – LA COURBE NDVI ILLUSTRE LA DYNAMIQUE SAISONNIÈRE DE LA VÉGÉTATION POUR LA ZONE D'ÉTUDE POUR 2021 ET EN MOYENNE SUR 30 ANS. LE PIC DE VÉGÉTATION A LIEU APRÈS LE PIC DE PLUVIOMÉTRIE (WFP, 2021).	63
FIGURE 22 – DISTRIBUTION DE LA SURFACE TOTALE DES EXPLOITATIONS (GAUCHE) ET DES SURFACES DE CHAQUE PARCELLE (DROITE). L'ABSCISSE DONNE LA GAMME DE SURFACE POUR CHAQUE BÂTONNET (PAR EXEMPLE LA GAMME 0 À 2 HA = [0, 2]).....	67
FIGURE 23 – DOSE DE N (GAUCHE) ET P (DROITE) APPLIQUÉE VIA LA FERTILISATION MINÉRALE (KG/HA).	72
FIGURE 24 – DOSE DE N (GAUCHE) ET P (DROITE) APPLIQUÉE VIA LA FERTILISATION MINÉRALE POUR LE MAÏS UNIQUEMENT ET POUR CHAQUE VILLAGE (KG/HA) ²² . AUCUN MAÏS N'ÉTAIT FERTILISÉ DANS NOTRE ÉCHANTILLON À SAMMONGOU.	72
FIGURE 25 – POURCENTAGE DE CHAQUE TYPE DE RÉSIDU DÉDIÉ À CHAQUE UTILISATION. LA CATÉGORIE « AUTRE », SOUVENT PEU VISIBLE, PREND À LA FOIS L'ALIMENTATION HUMAINE, LE DÉPÔT EN DEHORS DU CHAMP, LE COMPOSTAGE, OU D'AUTRES UTILISATIONS NON-RÉPERTORIÉES. N = NOMBRE DE RÉPONDANTS POUR CHAQUE TYPE DE CULTURES.	73
FIGURE 26 – COMPARAISON DE L'ÉCART TYPE DES VALEURS DE RÉFLECTANCE, PAR BANDE ET PAR MÉTHODE DE PANSARPENING. ...	75
FIGURE 27 – COMPARAISON DES RÉSULTATS DU PANSARPENING, SELON LA MÉTHODE BAYÉSIENNE OU IHS, À PARTIR DES IMAGES MULTI-SPECTRALES (MS) ET PANCHROMATIQUES (PAN).....	76
FIGURE 28 – COMPARAISON DES MASQUES DE NUAGES. C) MONTRE LE MASQUE FINAL APRÈS APPLICATION DU FILTRE « SIEVE ».	76
FIGURE 29 – ZOOM SUR DES CHAMPS DE A) COTON ET DE B) RIZ. 1) IMAGE PANSARPENED EN COMPOSITION COLORÉE 3-2-1 ; 2) IMAGE EN COMPOSITION COLORÉE 4-1-2 ; 3) CLASSIFICATION À 17 CLASSES, SELON LE DATASET 9. POUR LA LÉGENDE, LE LECTEUR EST PRIÉ DE CONSULTER LA FIGURE SUIVANTE.	79
FIGURE 30 – ZOOM SUR QUELQUES ZONES CARACTÉRISTIQUES. A) UN CHAMP DE SOJA VERT B) DES CHAMPS DE MAÏS SÉNESCENT ET VERT ET UN CHAMP DE SOJA VERT C) UNE ZONE FORESTIÈRE AVEC AU CENTRE UNE CLAIRIÈRE AVEC DU SOL NU D) ZONE DE SAVANE À CÔTÉ DES HABITATIONS. 1) IMAGE EN COMPOSITION COLORÉE 3-2-1 ; 2) IMAGE EN COMPOSITION COLORÉE 4-1-2 ; 3) CLASSIFICATION À 17 CLASSES, SELON LE DATASET 9 ; 4) CARTE DU DEGRÉ DE CONFIANCE DE LA CLASSIFICATION. V = VERT, S = SÉNESCENT, VÉGÉ HERB. = VÉGÉTATION HERBACÉE, A = AGRICOLE, C = DE TYPE CUIRASSE, AU = AUTRE.	80
FIGURE 31 – COMPARAISON DES DIFFÉRENTS NIVEAUX DE CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DES SOLS APPLIQUÉ SUR UNE ZONE DIVERSIFIÉE AVEC DES CHAMPS, DES SOLS NUS, ET UNE FORÊT GALLERIE. 1) IMAGE PANSARPENED EN COMPOSITION COLORÉE 3-2-1 ; 2) CLASSIFICATION AU NIVEAU 4 ; 3) CLASSIFICATION AU NIVEAU 4, APRÈS APPLICATION D'UN FILTRE DE MAJORITÉ ; 4) CLASSIFICATION AU NIVEAU 3 ; 5) CLASSIFICATION AU NIVEAU 2 ; 6) CLASSIFICATION AU NIVEAU 1. V = VERT, S = SÉNESCENT, A = AGRICOLE, C = DE TYPE CUIRASSE, AU = AUTRE, VÉGÉ = VÉGÉTATION.	83
FIGURE 32 - ZOOM SUR UNE ZONE DE GONRI. LES PIXELS EN ROUGE SONT LES PIXELS DE LA CLASSIFICATION QUI ONT CHANGÉ DE CLASSE SUITE À LA CLASSIFICATION HIÉRARCHIQUE.....	84
FIGURE 33 – CARTOGRAPHIE FINALE DE GONRI, SUR BASE DU DATASET 9. POUR FACILITER LA VISUALISATION, L'ENTIÈRETÉ DU VILLAGE N'EST PAS VISIBLE. LES CLASSES DE VERGERS, DE MARAÎCHAGE ET DE ROUTES ONT ÉTÉ AJOUTÉES MANUELLEMENT. LES ZONES BLANCHES CORRESPONDENT AUX ZONES À L'EXTÉRIEUR DES LIMITES DE VILLAGE, QUE NOUS AVONS DÉFINIES. LE RECTANGLE NOIR REPRÉSENTE LA ZONE SUR LAQUELLE UN ZOOM EST EFFECTUÉ AU 3). 1) CLASSIFICATION AU NIVEAU 3, AVEC UN FILTRE DE	

MAJORITÉ ; 2) IMAGE PANSHARPENED DE GONRI ; 3) ZOOM SUR UNE ZONE DE CULTURES. A = AGRICOLE, VÉGÉ = VÉGÉTATION.	85
FIGURE 34 – COMPARAISON ENTRE TROIS CARTOGRAPHIES D’OCCUPATION DU SOL. 1) NOTRE CLASSIFICATION, AU NIVEAU 3 ; 2) LA WORLDCOVER DE L’ESA, À 10M ; 3) LE ESRI LANDCOVER, À 10M. VÉGÉ = VÉGÉTATION, A = AGRICOLE. SOURCE : (ESA, 2020) ; (ESRI, 2020).	89
FIGURE 35 – RENDEMENTS DÉCLARÉS (T/HA) PAR L’ENSEMBLE DES AGRICULTEURS (TOUS VILLAGES CONFONDUS).....	90
FIGURE 36 – RENDEMENTS DÉCLARÉS (T/HA) DE MAÏS PAR VILLAGE ²⁶	91
FIGURE 37 – RENDEMENTS DÉCLARÉS (T/HA) DE SOJA PAR VILLAGE ²⁶	92
FIGURE 38 – RENDEMENT EN BIOMASSE HERBACÉE EN FONCTION DES DIFFÉRENTS FACTEURS EXPLICATIFS : (A) VILLAGE, (B) TYPE DE SOL, (C) TRANSECT, ET (D) TYPE DE VÉGÉTATION. CHAQUE POINT REPRÉSENTE LA MOYENNE MESURÉE POUR UN TRANSECT À LA MI-AOÛT.	93
FIGURE 39 – PRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DES BILANS COMPLETS DES SCÉNARIOS 1, 2 ET 3 (DE HAUT EN BAS) POUR LE VILLAGE DE GONRI.	98
FIGURE 40 – BILAN DE N ET P [MG] À L’ÉCHELLE DU TERROIR (SURFACE AGRICOLE ET SAVANES) DE CHAQUE SCÉNARIO. LE DÉFICIT TOTAL EST LA SOMME DES BILANS COMPLETS NÉGATIFS DE TOUTES LES SPÉCULATIONS. L’APPORT DU BÉTAIL EST LA QUANTITÉ DE NUTRIMENT RESTITUÉE PAR LES ANIMAUX SI L’ON CONSIDÈRE 100 % DES DÉJECTIONS. LE BILAN-100 EST LA DIFFÉRENCE DES DEUX.	102
FIGURE 41 – ILLUSTRATION DES QUATRE MÉTHODES DE CALCUL DES AIRES DE CHAQUE SPÉCULATION POUR UNE PARCELLE DE SOJA ET UNE PARCELLE DE MAÏS CONTENANT DE L’ARACHIDE ENTRE SES LIGNES.	121
FIGURE 42 – LOI DE LIEBIG SUR LE MINIMUM : LA CROISSANCE EST LIMITÉE PAR L’ÉLÉMENT LE MOINS PRÉSENT (MACK, 2019)	125
FIGURE 43 – QUANTITÉ DE P (GAUCHE) ET DE N (DROITE) COURAMMENT TROUVÉE SOUS CHAQUE FORME DANS LE CYCLE DU P ET N (IFA, 2016).	126
FIGURE 44 – 27 IMAGES MONTRANT L’EXEMPLE D’UN FORMULAIRE KOBO TOOLBOX RÉALISÉ DANS LE VILLAGE DE GONRI. LES PAGES RÉPÉTITIVES ONT ÉTÉ RETIRÉES, L’ENQUÊTE COMPORTE AU TOTAL 58 PAGES.....	135
FIGURE 45 – 3 IMAGES MONTRANT L’EXEMPLE D’UN FORMULAIRE KOBO TOOLBOX POUR ENREGISTRER DES INFORMATIONS SUR LES POINTS GPS. ICI, UN SEUL POINT GPS EST MONTRÉ.....	136
FIGURE 46 – REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉ DU BILAN COMPLET DU SCÉNARIO 2.1.....	146
FIGURE 47 – STATISTIQUES SUR LES PRÉCIPITATIONS ET LE NDVI POUR LA ZONE D’ÉTUDE. A GAUCHE, DONNÉES OBSERVÉES ET MOYENNE SUR 30 ANS. A DROITE, ANOMALIE OBSERVÉE POUR 2021 (WFP, 2021A).	148

Table des tableaux

TABEAU 1 – LISTE DES LOGICIELS UTILISÉS.	34
TABEAU 2 – BANDES SPECTRALES DES SATELLITES PLÉIADES 1A ET 1B (AIRBUS DEFENCE AND SPACE INTELLIGENCE, 2012).....	36
TABEAU 3 – NOMBRE TOTAL DE POINTS GPS RÉCOLTÉS PAR VILLAGE ET PAR TYPE DE SOL. LE NOMBRE TOTAL DE POINTS NE CORRESPOND PAS AU NOMBRE TOTAL DE POINTS PAR TYPE DE SOL CAR, POUR CERTAINS POINTS, LE TYPE DE SOL N’A PAS PU ÊTRE IDENTIFIÉ.	38
TABEAU 4 – NOMBRE DE POINTS GPS RÉCOLTÉS PAR CATÉGORIE D’OCCUPATION DE SOL ET PAR VILLAGE. LES POINTS CORRESPONDANT À UN MÉLANGE DE CULTURE PLUVIALE AVEC DU MARAICHAGE OU UN VERGER ONT ICI ÉTÉ CONSIDÉRÉS COMME DES CULTURES PLUVIALES.....	39
TABEAU 5 – DESCRIPTION DES INDICES DE VÉGÉTATION. LES BANDES 1, 2, 3 ET 4 SONT REPRÉSENTÉES PAR LES LETTRES R (ROUGE), G (VERT), B (BLEU) ET PIR (PROCHE INFRAROUGE).....	42
TABEAU 6 – LA LÉGENDE D’OCCUPATION DES SOLS, DIVISÉE EN QUATRE NIVEAUX. LES DEUX DERNIÈRES COLONNES REPRENNENT LE NOMBRE DE ROI PAR CLASSE ET LE % DE SURFACE QU’ELLES REPRÉSENTENT. VÉGÉ = VÉGÉTATION.	44
TABEAU 7 – COMPARAISON DES ROI DE CULTURES PAR RAPPORT AUX DONNÉES D’ENQUÊTES. LES POURCENTAGES SONT CALCULÉS UNIQUEMENT PAR RAPPORT À CES QUATRE CLASSES DE CULTURES.	45

TABLEAU 8 – RÉCAPITULATIF DES DATASETS UTILISÉS POUR LA CLASSIFICATION. TOUS LES DATASETS ONT UNE RÉOLUTION SPATIALE DE 0.5 M, SAUF LE NUMÉRO 1.....	45
TABLEAU 9 – REPRÉSENTATION THÉORIQUE D’UNE MATRICE DE CONFUSION. LES CASES GRISÉES REPRÉSENTENT LES PIXELS CORRECTEMENT PRÉDITS.....	48
TABLEAU 10 – CONVERSION DES UNITÉS DE MESURE LOCALES EN KILOGRAMME (ADAPTÉ DE KANTE, 2001).....	50
TABLEAU 11 – NOUVELLE NOMENCLATURE UTILISÉE POUR COMPARER LES SOLS DES DIFFÉRENTS VILLAGES.....	51
TABLEAU 12 – ILLUSTRATION DE LA CORRECTION APPLIQUÉE POUR LES CULTURES ASSOCIÉES.....	52
TABLEAU 13 – MÉTHODOLOGIE POUR DÉTERMINER LE POURCENTAGE DE CHAQUE RÉSIDU DÉDIÉ À CHAQUE UTILISATION.....	53
TABLEAU 14 – NOMBRE DE CARRÉS D’ÉCHANTILLONNAGE RÉALISÉ PAR PARTIE DE PLANTE (TIGES, FEUILLES, ETC.) ET PAR SPÉCULATION ET NOMBRE DE PARCELLES TOTALES ÉCHANTILLONNÉES.....	54
TABLEAU 15 – SPÉCULATION LES PLUS IMPORTANTES DE GONRI SELON LES ENQUÊTES.....	57
TABLEAU 16 – TERMES D’UN BILAN COMPLET DE NUTRIMENTS ET LEURS ABRÉVIATIONS UTILISÉES DANS CE TRAVAIL.....	58
TABLEAU 17 – TENEURS EN MATIÈRE SÈCHE (MS), EN AZOTE ET EN PHOSPHORE DE QUELQUES FERTILISANTS ORGANIQUES (VLAMING & HEESMANS, 2019).....	59
TABLEAU 18 – CONCENTRATION EN AZOTE ET PHOSPHORE DES PRODUITS DE RÉCOLTE ET RÉSIDUS DE CULTURE (D’APRÈS BOUWMAN ET AL., 2017).....	61
TABLEAU 19 – DONNÉES UTILISÉES POUR LE CALCUL DU RAPPORT ENTRE LA BIOMASSE HERBACÉE RÉCOLTÉE MI-AOUT ET AU MAXIMUM DE VÉGÉTATION SELON SINSIN (1993).....	64
TABLEAU 20 – COEFFICIENTS D’INGESTION ET CONCENTRATIONS EN NUTRIMENTS UTILISÉS POUR LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DE VÉGÉTATION.....	65
TABLEAU 21 – SUPERFICIE DES ZONES CULTIVÉES PAR TYPE DE SOL (NOMS COMMUNS) ET PAR VILLAGE (DONNÉES D’ENQUÊTE). LES SOLS LES PLUS IMPORTANTS DE CHAQUE VILLAGE SONT INDIQUÉ EN BLEU ITALIQUE.....	68
TABLEAU 22 – DIFFÉRENCE ENTRE LA SURFACE TOTALE CULTIVÉE PAR LES 177 INTERROGÉS ET LA SURFACE DES CULTURES POUR LESQUELLES NOUS DISPOSONS D’INFORMATIONS DÉTAILLÉES (FERTILISATION, RENDEMENTS, ETC.).....	69
TABLEAU 23 – SUPERFICIE (HA) ET POURCENTAGE DE SURFACE PAR SPÉCULATION ET PAR VILLAGE SELON LES ENQUÊTES. LES TROIS (OU QUATRE) SPÉCULATIONS LES PLUS IMPORTANTES DE CHAQUE VILLAGE SONT INDIQUÉES EN BLEU ITALIQUE.....	69
TABLEAU 24 – POURCENTAGE DES SURFACES EN CULTURE ASSOCIÉE PAR VILLAGE (SELON LES ENQUÊTES).....	70
TABLEAU 25 – POURCENTAGE DES SURFACES DE CHAQUE SPÉCULATION RECEVANT UN APPORT DE NPK, D’URÉE OU D’AMENDEMENTS ORGANIQUES (POUR L’ENSEMBLE DES VILLAGES ET SUR BASE DES DONNÉES DÉCLARATIVES).....	71
TABLEAU 26 – RÉSUMÉ DE L’EXACTITUDE DE L’UTILISATEUR, L’EXACTITUDE DU PRODUCTEUR ET DU F-SCORE DES MASQUES DE NUAGE.....	77
TABLEAU 27 - EXACTITUDE GLOBALE DES CLASSIFICATIONS EN UNE ÉTAPE POUR CHAQUE DATASET.....	78
TABLEAU 28 - MATRICE DE CONFUSION POUR LA CLASSIFICATION EN UNE ÉTAPE DU DATASET N°9. LES CELLULES QUI SONT DANS LES 15 % DES VALEURS LES PLUS ÉLEVÉES SONT COLORÉES EN ROUGE. LES CELLULES AVEC LES PIXELS CORRECTEMENT PRÉDITS SONT ENCADRÉES. V = VERT, S = SÉNESCENT, A = AGRICOLE, C = DE TYPE CUIRASSE, AU = AUTRE. « HERBE » CORRESPOND À LA VÉGÉTATION HERBACÉE.....	78
TABLEAU 29 – LES F-SCORES POUR CHAQUE CLASSE ET CHAQUE NIVEAU DE CLASSIFICATION DE L’OCCUPATION DU SOL. LES CASES SONT COLORÉES EN ROUGE (< 0.5), ORANGE (0.5-0.7), VERT (> 0.7). VÉGÉ = VÉGÉTATION.....	81
TABLEAU 30 – LES SURFACES OCCUPÉES PAR CHAQUE TYPE D’OCCUPATION DU SOL, CALCULÉES APRÈS SOUSTRACTION DES NUAGES. VÉG HERB. = VÉGÉTATION HERBACÉE.....	86
TABLEAU 31 – ESTIMATION DES RENDEMENTS EN RÉSIDUS SUR BASE DES RENDEMENTS EN PRODUITS DÉCLARÉ ET DES INDICES DE RÉCOLTE (IR) DE LA LITTÉRATURE.....	92
TABLEAU 32 – SURFACE DE COURONNE TOTALE SUR L’ENSEMBLE DES TRANSECTS PAR TYPE D’APPORT FOURRAGER.....	94
TABLEAU 33 – BILAN FINAL DE PHYTOMASSE POUR LES ZONES DE SAVANE ET FORÊT. LES LETTRES RAPPEL LA SOURCE DE CHAQUE VALEUR ET RENVOIE VERS LES DIFFÉRENTES SECTIONS.....	94
TABLEAU 34 – BILAN DE PHYTOMASSE VALORISABLE POUR LA FERTILISATION DES CHAMPS POUR LE VILLAGE DE GONRI.....	95

TABLEAU 35 – BILANS PARTIELS, BILANS COMPLETS ET NUUE POUR D’AZOTE ET DE PHOSPHORE DU PREMIER SCÉNARIO. LES NOMS DES TERMES SONT INDIQUÉS À GAUCHE DU TABLEAU ET LES UNITÉS RELATIVES À CHAQUE LIGNE SONT À DROITE (BNF = FIXATION D’AZOTE BIOLOGIQUE).....	96
TABLEAU 36 – APPORT DE NUTRIMENTS DES SAVANES APRÈS CONVERSION DES PHYTOMASSE EN NUTRIMENTS ET EN TENANT COMPTE DU COEFFICIENT D’APPÉTIBILITÉ ET DE PRÉSERVATION. LE TERME « TOTAL EN DÉJECTION » TIENT AUSSI COMPTE DES PERTES DE 40 ET 87 % DE N ET P PAR L’ANIMAL ENTRE L’INGESTION ET L’EXCRÉTION. LES INPUTS SONT CALCULÉS EN MULTIPLIANT LES RENDEMENTS EN PHYTOMASSE (CF. IV3.5) PAR LES TENEURS EN NUTRIMENT (CF. III5.3.2, TABLEAU 20).....	97
TABLEAU 37 – CALCUL D’INGESTION ET D’EXCRÉTION DES NUTRIMENTS DES SAVANES ET DES RÉSIDUS EN [MG]. LES NUTRIMENTS TOTAUX DES SAVANES DU TERROIR SONT CALCULÉS AU TABLEAU 36.	99
TABLEAU 38 – BILANS COMPLETS DES SPÉCULATIONS EN DÉFICIT, APPORT POTENTIEL DE NUTRIMENT PAR LE BÉTAIL, ET BILAN GLOBAL (POUR LE SCÉNARIO 2). LES « BILAN-100 » ET « BILAN-50 » CORRESPONDENT AUX BILANS OÙ, RESPECTIVEMENT, 100 ET 50 % DES DÉJECTIONS ANIMALES SERAIENT RÉCUPÉRÉES ET APPORTÉES AUX CULTURES EN DÉFICIT.....	100
TABLEAU 39 – BILANS COMPLETS DES SPÉCULATIONS EN DÉFICIT, APPORT POTENTIEL DE NUTRIMENT PAR LE BÉTAIL, ET BILAN GLOBAL (POUR LE SCÉNARIO 3). LES « BILAN-100 » ET « BILAN-50 » CORRESPONDENT AUX BILANS OÙ, RESPECTIVEMENT, 100 ET 50 % DES DÉJECTIONS ANIMALES SERAIENT RÉCUPÉRÉES ET APPORTÉES AUX CULTURES EN DÉFICIT.....	101
TABLEAU 40 – COMPARAISON DE DIVERSES MÉTHODES D’ESTIMATION DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE EN FONCTION DE LEUR RENTABILITÉ, DE LEUR ÉCHELLE ET DE LEUR PRÉCISION (ADAPTÉ DE SAPKOTA ET AL., 2016).	119
TABLEAU 41 – REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES VALEURS DE BIOMASSE HERBACÉE DES SAVANES EN AFRIQUE DE L’OUEST.T.....	123
TABLEAU 42 – REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES VALEURS DE BIOMASSE FOLIAIRE LIGNEUSE DES SAVANES EN AFRIQUE DE L’OUEST.	124
TABLEAU 43 – DÉTAILS SUR LA NOUVELLE NOMENCLATURE DES SOLS DE LA RÉGION.	137
TABLEAU 44 – (GAUCHE) EXEMPLE D’UN TABLEAU DE COMPTAGE DES STRATES DE CHAQUE QUADRAT DE 1M ² OBSERVÉES DANS CHACUN DES DEUX TRANSECTS RÉALISÉS DANS UN CARRÉ DE 900M ² . (DROITE) RÉCAPITULATIF DE LA FRÉQUENCE DE CHAQUE STRATE POUR LES DEUX TRANSECTS.	138
TABLEAU 45 - NOMBRE DE PIXELS ET DE POLYGONES DES AIRES DE VALIDATION DE CHACUNE DES CLASSES.....	138
TABLEAU 46 – DESCRIPTION DE L’ÉCHANTILLON DE POPULATION INTERROGÉ LORS DES ENQUÊTES.	139
TABLEAU 47 – NIVEAU D’INSTRUCTION EN FONCTION DU SEXE DES PERSONNES INTERROGÉES.....	140
TABLEAU 48 – NOMBRE DE SPÉCULATIONS* RECENSÉES PAR VILLAGE LORS DES ENQUÊTES.....	140
TABLEAU 49 – NOMBRE DE SPÉCULATIONS FERTILISÉES CHIMIQUEMENT PAR VILLAGE (SELON LES DONNÉES D’ENQUÊTE).	140
TABLEAU 50 – ASSOCIATIONS DE CULTURES RECENSÉES PAR VILLAGE. NOMBRE (N) ET SUPERFICIE DES PARCELLES. LE TERME « AUTRE » A ÉTÉ UTILISÉ LORS D’UN OUBLI DE L’AGRICULTEUR OU UNE ERREUR D’ENCODAGE.....	141
TABLEAU 51 – NOMBRE ET SURFACE DE PARCELLE FERTILISÉ AVEC L’ENGRAIS NPK PAR SPÉCULATION ET PAR VILLAGE.	141
TABLEAU 52 – NOMBRE ET SURFACE DE PARCELLE FERTILISÉ AVEC DE L’URÉE PAR SPÉCULATION ET PAR VILLAGE.....	143
TABLEAU 53 – NOMBRE ET SURFACE DE PARCELLE FERTILISÉ PAR AMENDEMENT ORGANIQUE PAR SPÉCULATION ET PAR VILLAGE.	144
TABLEAU 54 – COMPARAISON ENTRE LES RENDEMENTS MOYENS CALCULÉS PAR LA FAO (MOYENNE DE 2010 À 2020 À L’ÉCHELLE NATIONALE) ET LES RENDEMENTS MOYENS DÉCLARÉS DANS LA ZONE D’ÉTUDE.	145
TABLEAU 55 – BILANS PARTIELS, BILANS COMPLETS ET NUUE POUR D’AZOTE ET DE PHOSPHORE DU SCÉNARIO 2. LES NOMS DES TERMES SONT INDIQUÉS À GAUCHE DU TABLEAU ET LES UNITÉS RELATIVES À CHAQUE LIGNE SONT À DROITE (BNF = FIXATION D’AZOTE BIOLOGIQUE).....	145
TABLEAU 56 - BILANS COMPLETS DES SPÉCULATIONS EN DÉFICIT, APPORT POTENTIEL DE NUTRIMENT PAR LE BÉTAIL, ET BILAN GLOBAL (POUR LE SCÉNARIO 2.1). LES « BILAN-100 » ET « BILAN-50 » CORRESPONDENT AUX BILANS OÙ, RESPECTIVEMENT, 100 ET 50 % DES DÉJECTIONS ANIMALES SERAIENT RÉCUPÉRÉES ET APPORTÉES AUX CULTURES EN DÉFICIT.	146
TABLEAU 57 – BILANS PARTIELS, BILANS COMPLETS ET NUUE POUR D’AZOTE ET DE PHOSPHORE DU SCÉNARIO 3. LES NOMS DES TERMES SONT INDIQUÉS À GAUCHE DU TABLEAU ET LES UNITÉS RELATIVES À CHAQUE LIGNE SONT À DROITE (BNF = FIXATION D’AZOTE BIOLOGIQUE).....	147
TABLEAU 58 – DÉTAILS DES CALCULS POUR LA SURFACE DE SAVANE NÉCESSAIRE POUR COMBLER LE DÉFICIT DU SCÉNARIO 3.	147

Liste des acronymes

ARES	Académie de Recherche et d'Enseignement supérieur
ASS	Afrique subsaharienne
BN	Bilan de nutriments
BNF	Biological Nitrogen Fixation
CBTF	UNEP-UNCTAD Capacity-Building Task Force on trade, environment, and development
CNES	Centre national d'études spatiales
ESA	European Space Agency
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (angl. IPCC)
HLPE	Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition
IFA	International Fertilizer Industry Association
IR	Indice de récolte
IR	Infrarouge
IRC	Indice de résidu de culture
MAEP	Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche du Bénin
MENC	Ministère de l'Economie Numérique et de la Communication du Bénin
MO	Matière organique
NuUE	Nutrient Use Efficiency
ODD	Objectif de Développement Durable
RC	Résidus de culture
ROI	Region of Interest
S2	Sentinel-2
WFP	World Food Program

Introduction

L'agroécologie est depuis quelques années de plus en plus portée sur le devant de la scène internationale et proposée comme réponse aux défis actuels de l'agriculture (FAO, 2018b; IAASTD, 2009; IPBES, 2019; IPCC, 2022a). Malgré cela, elle n'a pas encore été transposée à grande échelle (Bernard & Lux, 2017).

L'agriculture produit aujourd'hui plus qu'assez de nourriture à l'échelle planétaire, en grande partie grâce aux différentes révolutions agricoles qui ont fortement augmenté la productivité de ce secteur. En 2013, on produisait l'équivalent de 2900 kcal/personne/jour, tandis que l'apport minimal nécessaire est de seulement 1850 kcal/personne/jour (Lambert, 2018). Un tiers de la nourriture produite est pourtant perdue, un tiers est utilisé pour l'alimentation animale, et une partie des terres cultivées sert à produire des biocarburants (Gustavsson et al., 2011; Lambert, 2018; Tscharncke et al., 2012). Malgré cette surproduction, en 2018, 820 millions de personnes (soit 11 % de la population mondiale) étaient sous-alimentées et environ 2 milliards de personnes étaient en situation d'insécurité alimentaire plus ou moins grave (FAO, 2019). Le paradoxe est que jusqu'à 50 % des personnes souffrant de la faim sont des agriculteurs vivant dans des exploitations de petite taille. D'un autre côté, 2 milliards d'adultes sont en excès pondéral (dont un tiers en situation d'obésité), et ces chiffres augmentent de manière alarmante dans toutes les régions du monde (FAO, 2019). Récemment, les espoirs d'une sortie de la crise causée par la Covid-19 ont été anéantis par les conflits, les extrêmes climatiques et les chocs économiques, et on assiste donc à une aggravation de la faim dans le monde (FAO, 2022).

Le monde, et l'Afrique subsaharienne (ASS) en particulier, fait face à de nombreux autres défis. D'une part, la population mondiale devrait augmenter de 2 milliards d'ici 2050, dont 1 milliard en ASS seulement, ce qui conduirait à un doublement en 30 ans (United Nations, 2019). Ces changements démographiques sont accompagnés d'une urbanisation rapide (Côte et al., 2019). D'autre part, le changement climatique est sûrement le défi majeur. Des actions « immédiates, rapides et à grande échelle » doivent être prises pour limiter le réchauffement à 1.5°C, certaines conséquences sont d'ores et déjà irréversibles, et le changement climatique est déjà observable dans toutes les régions du monde (IPCC, 2021). L'Afrique de l'Ouest est une des régions du monde les plus vulnérables aux changements climatiques, or c'est aussi une des régions les moins émettrices de gaz à effet de serre (GES). La liste des conséquences observées ou prévues en Afrique de l'Ouest est longue : des événements météorologiques et climatiques extrêmes plus fréquents (vagues de chaleur, pluies intenses, sécheresses), une moins bonne productivité agricole (jusqu'à - 22 %; Leippert et al., 2020), plus d'insécurité alimentaire et hydrique, une mortalité plus élevée, une moins bonne productivité des systèmes pastoraux, plus de ravageurs et de maladies (en particulier la dengue), un affaiblissement de la santé des sols et de la biodiversité, etc. (IPCC, 2019a, 2022a, 2022b).

L'agriculture contribue pour 17 % des GES globalement, ce qui en fait une cible intéressante pour l'atténuation de nos émissions (FAO, 2020). Cependant, en plus de diminuer nos émissions, il faut également s'adapter au changement climatique. L'agroécologie est proposée comme une des solutions pour répondre simultanément à ces deux enjeux (IPCC, 2022a). Un autre défi est la dégradation des terres, particulièrement importante en ASS et qui se manifeste surtout sous forme d'érosion et d'épuisement des éléments nutritifs des sols. Elle a entraîné une réduction de la productivité agricole sur 23 % de la surface terrestre. De plus, la biodiversité mondiale, et donc aussi l'agriculture, est en danger. 25 % des espèces d'animaux et de végétaux sont menacées d'extinction, soit environ un million d'espèces. Le changement d'utilisation des terres, principalement dû à l'expansion agricole, est le facteur ayant eu le plus d'incidence néfaste sur la nature. En effet, un tiers des terres émergées sont consacrées à la production végétale ou animale, et trois quarts des terres sont altérées de manière significative. Ici aussi, l'agroécologie est citée comme solution (IPBES, 2019; Tapsoba et al., 2020).

En résumé, on constate que la révolution verte, débutée en Afrique dans les années 50, n'a pas réussi à accomplir son objectif principal d'assurer la sécurité alimentaire malgré des gains de productivité importants. De plus, ce modèle a causé des impacts environnementaux et sociaux négatifs (utilisation insoutenable des ressources naturelles : dégradation des terres, réduction de la biodiversité ; dépendance face aux intrants, malnutrition, faible résilience socioéconomique, etc.) (FAO, 2018c; Tapsoba et al., 2020). La situation actuelle est donc favorable au développement de l'agroécologie à grande échelle (FAO, 2018b).

La pratique de l'agroécologie requiert néanmoins l'utilisation de matières organiques (MO) (compost, fumier, résidus de culture, etc.) pour remplacer partiellement ou totalement les engrais minéraux et entretenir la qualité des sols. Une réflexion doit avoir lieu quant à la disponibilité en qualité et en quantité de ces ressources organiques. Cette réflexion doit se faire à l'échelle du village pour correspondre au mieux à la réalité du terrain. Il n'est pas nécessaire d'adopter une échelle régionale car il n'y a presque pas d'échanges entre les villages à cause du manque de moyens de transport adaptés et des conflits entre groupes ethniques ; la quasi-totalité des terres cultivées d'un village sont cultivées par les habitants du village et le pâturage se fait principalement au sein des limites du village. L'échelle du producteur est quant à elle trop petite, car au sein d'un village les pratiques des producteurs varient fort et le bétail pâture librement entre les parcelles des différents producteurs.

L'objectif général de ce mémoire sera de quantifier les ressources organiques potentiellement valorisables comme amendements organiques. Cet objectif peut être décomposé en quatre sous-objectifs :

1. Quantifier les sources de matières organiques à l'échelle du village.
2. Quantifier les besoins en matières organiques à l'échelle du village.

3. Réaliser un bilan de nutriments à l'échelle du village, en identifiant et quantifiant les flux de nutriments d'origine minérale ou organique, afin d'analyser si les engrais minéraux peuvent être remplacés par des engrais organiques.
4. Identifier les freins et leviers pour l'augmentation de la valorisation des matières organiques et l'accélération de la transition agroécologique à grande échelle.

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est divisé en cinq parties. Tout d'abord, une revue de littérature est menée, afin de mieux comprendre l'agroécologie, l'agriculture familiale en ASS, et les méthodes de quantification de la biomasse (Chapitre I : Etat de l'art). Ensuite, la zone d'étude (région de l'Atacora, Bénin) où a été menée la campagne de terrain durant l'été 2021 est décrite (Chapitre II : Zone d'étude). Le troisième chapitre est dédié à l'explication des outils utilisés et de la méthodologie appliquée (Chapitre III : Matériels et méthodes). Nous présenterons et discuterons ensuite les résultats de nos analyses (Chapitre IV : Résultats et Discussion). Enfin, après avoir tiré nos conclusions, nous analyserons de façon critique notre travail et discuterons de pistes pour le développement de l'agroécologie à une plus grande échelle (Chapitre V : Conclusion).

Précisons également que ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la thèse de doctorat de Victorine Djago : « Évaluation des performances et du potentiel de mise à échelle des pratiques agroécologiques de fertilisation et de conservation des sols dans les agrosystèmes céréaliers et maraîchers dans l'Atacora (Bénin) et la province du Houët (Burkina Faso) ». Ce doctorat fait lui-même partie du projet « AGRO-ECO », coordonné par l'UCLouvain et financé par l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur de la Fédération Wallonie-Bruxelles (ARES). Ce projet vise l'«amplification de la transition agroécologique pour des systèmes de productions céréaliers et maraichers profitables et durables » au Bénin et au Burkina Faso (ARES, s. d.).

I Etat de l'Art

Cette revue de littérature est divisée en quatre parties. En premier lieu, l'historique, les définitions, les principes ainsi que les atouts et limitations de l'agroécologie seront discutés : à l'échelle mondiale puis régionale (I.1). Ensuite, l'agriculture familiale en ASS sera définie et analysée et nous soulignerons les challenges et opportunités qui lui sont propres (I.2). Finalement, une revue des méthodes nécessaires pour la réalisation de ce travail sera présentée : les méthodes disponibles pour quantifier des ressources organiques (I.3), cartographier par télédétection (I.4) et évaluer des flux de nutriments (I.5).

1 Concept d'Agroécologie

1.1 Historique, Définitions et Principes

La première trace du mot « agroécologie » remonte à 1928, quand il a été utilisé dans le titre d'un livre de Bensin (1928, cité dans Wezel et al., 2009). Depuis la publication de cet ouvrage, la signification du mot a évolué, tout comme son champ d'application. Au départ, le mot signifiait simplement l'application de l'écologie aux sciences agricoles (soit la zoologie, l'agronomie et la physiologie des cultures) (HLPE, 2019; Wezel & Soldat, 2009). Plusieurs travaux portant sur les concepts de l'agroécologie furent aussi réalisés sans mentionner explicitement le mot « agroécologie » (Klages, 1928; Friederichs, 1930; cités dans Wezel et al., 2009 et Wezel & Soldat, 2009). Jusqu'en 1970, l'agroécologie était donc uniquement considérée comme une science.

À partir des années 1970, le terme d'agroécologie fut progressivement également utilisé pour désigner un mouvement ou une série de pratiques, en partie en réaction à la révolution verte (Wezel et al., 2009). À partir de 1980 et surtout de 2000, le nombre de publications scientifiques traitant de l'agroécologie augmente significativement, indiquant que l'agroécologie devient de plus en plus populaire (Wezel & Soldat, 2009). Le champ d'application du terme évolua aussi dans la recherche scientifique, devenant de plus en plus transdisciplinaire. Il passa de l'échelle du champ à l'échelle de l'agroécosystème, puis à l'échelle de l'ensemble du système alimentaire (Francis et al., 2003; HLPE, 2019; Wezel et al., 2009; Wezel & Soldat, 2009). En effet, Francis et al. (2003) définissent l'agroécologie de façon transdisciplinaire comme : « *l'étude intégrative de l'écologie de l'ensemble du système alimentaire, qui englobe les dimensions écologiques, économiques et sociales.* » Altieri (1995, cité dans HLPE, 2019), définit quant à lui l'agroécologie comme « *l'application des concepts et principes de l'écologie à la conception et à la gestion d'agroécosystèmes durables* ». Etant donné l'échelle adoptée ici, c'est cette définition qui sera utilisée dans le cadre de ce mémoire.

Le chercheur Miguel Altieri, considéré comme un pionnier de l'agroécologie et qui a publié le plus grand nombre de travaux sur l'agroécologie (Wezel & Soldat, 2009), a aussi

popularisé les cinq principes de cette discipline (Altieri, 1995, basé sur Reijntjes et al., 1992). En 2016, ces principes ont été reformulés par Nicholls & Altieri (p. 4, traduit de l'anglais) :

1. *« Améliorer le recyclage de la biomasse, en vue d'optimiser la décomposition de la matière organique et le cycle des nutriments au fil du temps.*
2. *Renforcer le "système immunitaire" des systèmes agricoles par l'amélioration de la biodiversité fonctionnelle - ennemis naturels, antagonistes, etc.*
3. *Fournir les conditions de sol les plus favorables à la croissance des plantes, notamment en gérant la matière organique et en renforçant l'activité biologique du sol.*
4. *Minimiser les pertes d'énergie, d'eau, de nutriments et de ressources génétiques en améliorant la conservation et la régénération des ressources en sol, en eau et d'agrobiodiversité.*
5. *Diversifier les espèces et les ressources génétiques dans l'agroécosystème dans le temps et l'espace, au niveau du champ et du paysage.*
6. *Renforcer les interactions biologiques bénéfiques et les synergies entre les composants de l'agrobiodiversité, favorisant ainsi les processus et les services écologiques clés. »*

Ces principes sont très généraux et peu concrets, le but étant que les pratiques associées à ces principes soient ensuite adaptées aux contextes locaux. Une fois appliquées, ces pratiques et leurs interactions permettent de réaliser des processus clés des agroécosystèmes (cycle des nutriments, conservation de l'eau, ...) (Nicholls & Altieri, 2016). En 2018, la FAO a élaboré les 10 éléments de l'agroécologie, suite à une synthèse de la littérature scientifique fondatrice de l'agroécologie (Altieri, 1995; Gliessman, 2014) et de séminaires régionaux de la FAO. L'objectif est d'aider les pays à rendre l'agroécologie opérationnelle. La Figure 1 représente les interactions entre les 10 éléments de l'agroécologie. Les synergies jouent un rôle central dans l'agroécologie. Par exemple, la fixation biologique de l'azote permet d'économiser de l'argent en engrais azotés, tout en contribuant à la santé des sols et à la lutte contre le changement climatique, et l'intégration entre culture et élevage permet aussi des synergies intéressantes (Compere Leroy & Cornu, 2021; FAO, 2018c). Finalement, en 2019, le groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition (HLPE) a dressé une liste de 13 principes agroécologiques, rassemblés et reformulés à partir de divers travaux.

Malgré ces principes, il faut souligner qu'il n'existe pas de règles pour déterminer ce qui est précisément « agroécologique » (Leippert et al., 2020). Par exemple, alors que certains veulent supprimer l'utilisation d'intrants commerciaux, d'autres veulent les réduire (principe N°2 du HLPE, 2019). Ce flou permet toutefois d'adapter les approches agroécologiques aux contextes locaux (HLPE, 2019).

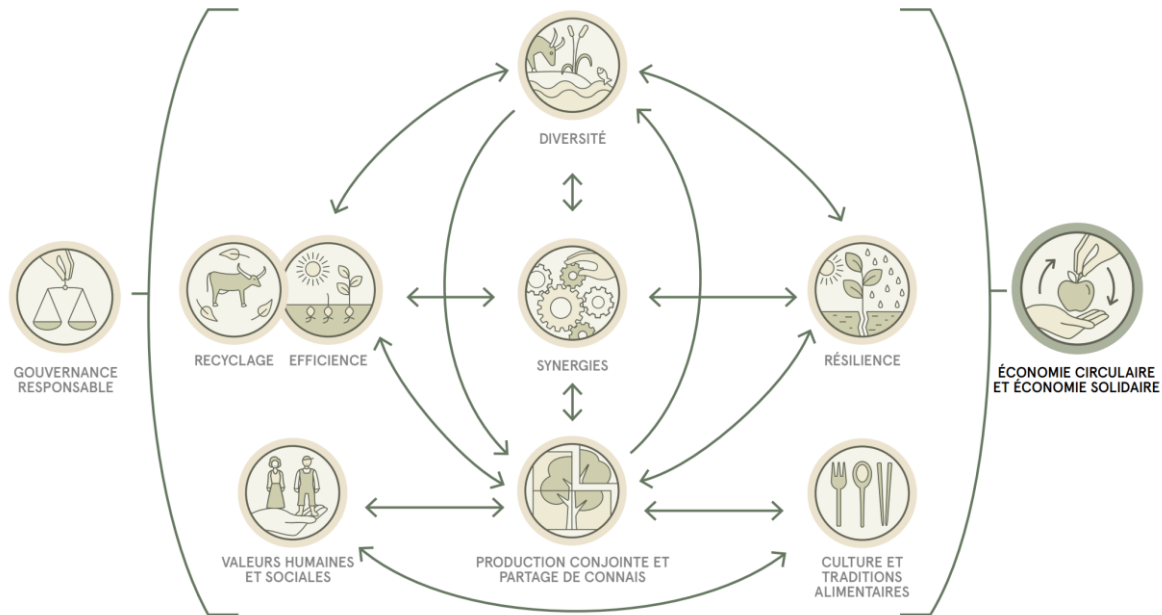


Figure 1 – Les 10 éléments de l'agroécologie et leurs interactions (FAO, 2018c).

L'agroécologie peut aussi difficilement être placée dans une catégorie précise. Selon certains auteurs, l'agroécologie peut être placée dans la catégorie d'intensification durable, qui consiste selon Pretty et al. (2011, p. 7) en :

« La production d'un plus grand nombre de produits à partir de la même surface de terre tout en réduisant les incidences négatives sur l'environnement et en même temps en augmentant les contributions au capital naturel et au flux des services environnementaux. »

Tous les auteurs ne s'accordent toutefois pas pour mettre l'agroécologie dans cette catégorie. Certains partisans de l'agroécologie sont sceptiques quant au concept d'intensification durable, la considérant trop orientée sur la production et l'intensification. Les opposants à l'agroécologie pensent quant à eux que l'agroécologie n'est pas une forme d'intensification durable car elle ne permettrait pas d'assurer de rendements satisfaisants. En résumé, les partisans de l'agroécologie et de l'intensification durable s'accordent sur les mêmes objectifs (éradiquer la faim dans le monde et réduire l'impact de l'agriculture sur l'environnement), pas sur les mêmes solutions. Le débat s'établit donc entre : il faut « nourrir le monde durablement » (intensification durable) ou « aider le monde à se nourrir lui-même » (agroécologie) (Bernard & Lux, 2017; Leippert et al., 2020).

1.2 Atouts et limitations de l'agroécologie

L'agroécologie est vue comme une solution à différents problèmes sociaux, environnementaux et économiques par de nombreux auteurs. D'autres auteurs ont émis des critiques à propos de l'agroécologie. Ci-dessous, nous en présentons un aperçu des possibles avantages et inconvénients. Cependant, il y a encore trop peu d'investissements dans la recherche en agroécologie, et certaines recherches sont controversées. La définition imprécise de l'agroécologie rend aussi la recherche plus difficile (HLPE, 2019; Leippert et al., 2020).

Il faut également souligner que l'agroécologie, dans le cadre de cette revue de littérature, est analysée en se concentrant sur les pays du Sud et en particulier l'Afrique subsaharienne (ASS). En effet, l'agroécologie a surtout été développée et promue dans ces pays car elle apporte une solution pour les sols pauvres, qui constituent une contrainte majeure à la production en Afrique (Vanlauwe & Giller, 2006). De plus, ces pays ont une agriculture peu mécanisée, une faible capacité à investir dans des intrants externes, des problèmes de sécurité alimentaire, et sont les plus vulnérables aux changements climatiques, ce qui fait que l'application de pratiques agroécologiques y est particulièrement pertinente (Bezner Kerr et al., 2021; IPCC, 2019b). Ceci ne veut toutefois pas dire que l'agroécologie n'est pas adaptée aux pays du Nord, mais les pratiques à y appliquer sont différentes (Billen et al., 2021; Poux & Aubert, 2018).

Plusieurs études ont constaté des gains de productivité en appliquant différentes pratiques agroécologiques (Chappell & LaValle, 2011; Garrity et al., 2010; Mousseau, 2015; Pretty et al., 2006). L'étude la plus souvent citée et qui porte sur le plus grand échantillon est celle de Pretty *et al.* (2006). Les auteurs ont analysé 286 projets dans 57 pays du Sud, et ont conclu que les pratiques appliquées avaient permis d'augmenter la productivité dans 12.6 millions de fermes, en moyenne de 79 %, tout en améliorant les services environnementaux. Après réanalyse, en Afrique, la hausse de la productivité serait même de 116 % (CBTF, 2008). L'augmentation de la productivité n'est pas seulement multiplicative, mais aussi additive, car de nouveaux types de cultures et d'élevages s'ajoutent aux produits existants (Pretty et al., 2011). Le HLPE (2019, p. 56) a rassemblé bien d'autres recherches effectuées et allant dans le même sens, mais précise qu'il « ignore dans quelle mesure les cas documentés jusqu'à présent sont représentatifs, et quels aspects des approches agroécologiques adoptées sont responsables de l'amélioration des rendements et des bénéfices ».

Au niveau de la sécurité alimentaire aussi, l'agroécologie est souvent citée comme une solution (Bezner Kerr et al., 2021; Chappell & LaValle, 2011; De Schutter, 2010; FAO, 2018a; HLPE, 2019; Mousseau, 2015). La sécurité alimentaire a été définie par le sommet mondial de l'alimentation comme (FAO, 1996, traduit de l'anglais) :

« L'accès physique et économique pour toutes les personnes et à tout moment, à une alimentation suffisante, saine et nutritive pour répondre à leurs besoins et préférences alimentaires pour une vie saine et active. »

Selon De Schutter (2010), rapporteur spécial des Nations-Unies sur le droit à l'alimentation, l'agroécologie permet d'assurer ces fonctions, grâce à la réduction de la pauvreté rurale (par la gestion durable de la fertilité des sols, la création d'emplois et l'augmentation des revenus) et la diversification de l'alimentation. Beaucoup de recherches citées par le HLPE (2019 ; Becerril, 2013) montrent en effet que la diversité des cultures est positivement liée à la nutrition. Le problème n'est en tout cas pas la disponibilité, car on produit assez de nourriture à l'échelle globale, mais plutôt l'accès inégal à l'alimentation et aux ressources (HLPE, 2019).

Bien que les aspects sociaux soient moins souvent discutés dans la littérature agroécologique (Bezner Kerr et al., 2021; Leippert et al., 2020), ils sont un des piliers pour réussir la transformation agroécologique, et font aussi partie des principaux bénéficiaires. L'agroécologie renforce la souveraineté alimentaire des populations et garantit leur santé. La souveraineté alimentaire a été définie par la Via Campesina (1996, p. 1, traduit de l'anglais) comme « *le droit de chaque pays de maintenir et de développer sa propre capacité de produire son alimentation de base, en respectant la diversité culturelle et agricole* ». L'agroécologie offre aux producteurs un revenu équitable (notamment grâce à la réduction des coûts de production), plus d'autonomie, une meilleure capacité d'adaptation, et des opportunités et plus de pouvoir aux femmes (FAO, 2018c). Finalement, l'agroécologie requiert plus de main d'œuvre, ce qui peut être vu comme une bonne nouvelle étant donné le chômage et l'exode rural dans les pays du Sud, même si le travail est lourd et que cela augmente les coûts (Bernard & Lux, 2017; FAO, 2018c).

Les systèmes de production agricoles durables comme l'agroécologie sont aussi connus pour être plus résistants et résilients, notamment face aux changements climatiques et à la désertification (Holt-Giménez, 2002; IPCC, 2019b; Leippert et al., 2020; Mousseau, 2015; Pretty et al., 2011). Le dernier rapport spécial du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) sur le changement climatique et les terres émergées estime, avec un degré élevé de confiance, que la combinaison de savoirs autochtones et locaux avec de nouvelles techniques de gestion durable des terres permet d'accroître la résilience face à ces défis (IPCC, 2019b). Holt-Giménez (2002) a comparé la vulnérabilité (c'est à dire la résilience et la résistance combinées) de parcelles agroécologiques et conventionnelles face à un ouragan. Les parcelles agroécologiques ont obtenu de bien meilleurs résultats (une plus grande couche arable, moins d'érosion, moins de pertes économiques, ...). La diversité des cultures permet une meilleure résistance aux maladies et ravageurs, selon la méta-analyse de Leippert *et al.* (2020). La plus grande capacité de rétention de l'eau dans les sols gérés agroécologiquement permet une meilleure résistance aux sécheresses, qui s'annoncent aussi

plus fréquentes avec le changement climatique (IPCC, 2019b; Leippert et al., 2020). Finalement, le co-avantage de l'agroécologie est qu'elle permet d'atténuer le changement climatique, en stockant du carbone dans les sols et en diminuant ou supprimant l'utilisation de fertilisants ou pesticides d'origine fossile (De Schutter, 2010; IPCC, 2019b; Leippert et al., 2020; Mousseau, 2015).

L'agroécologie favorise également les externalités environnementales positives, et particulièrement la biodiversité et la diminution du ruissellement et de l'érosion (Giller et al., 2009; Mousseau, 2015; Pretty et al., 2011). Dans leur article de synthèse, Chappell & LaValle (2011) citent de nombreux exemples qui ont démontré une relation positive entre agriculture alternative et biodiversité. Toutefois, il y a un débat sur l'agroécologie et la conservation de la biodiversité. Faut-il favoriser l'économie des terres (« land sparing ») ou le partage des terres (« land sharing »), et dans quelle catégorie l'agroécologie peut-elle être placée ? Le but de la première vision est de maximiser la productivité sur un espace réduit pour conserver un maximum d'espaces naturels (c'est en particulier l'objectif de l'intensification durable), tandis que la deuxième vision vise à combiner la production à la conservation de la biodiversité sur un même espace (Chappell et al., 2009; Chappell & LaValle, 2011; Fischer et al., 2008; HLPE, 2019).

Une difficulté de l'agroécologie est qu'elle requiert beaucoup de connaissances. En effet, selon De Schutter (2010, p. 7) :

« L'agroécologie utilise une forte intensité de connaissances et elle repose sur des techniques qui ne sont pas fournies du sommet à la base mais mises au point à partir des connaissances et de l'expérience des agriculteurs. »

La forte intensité de connaissances requises serait même la première barrière à l'adoption de l'agroécologie, selon Leippert *et al.* (2020). Toutefois, elle permet une meilleure adaptation aux contextes locaux et les initiatives comme les fermes-écoles permettent le partage et la co-crédation de connaissances (élément N°2 de l'agroécologie ; FAO, 2018b) (Leippert et al., 2020).

Certains auteurs, comme Mugwanya (2019), critiquent fortement l'agroécologie. Par exemple, elle ne ferait que laisser les paysans dans le statut quo, ou au mieux affinerait un peu leurs techniques au lieu de transformer l'agriculture, car la plupart des paysans ont déjà des techniques proches de l'agroécologie (cultures associées, paillage, peu de mécanisation). Les organismes génétiquement modifiés, résistants aux maladies, à la sécheresse, ou avec une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote, ne devraient pas non plus être désapprouvés par les promoteurs de l'agroécologie, selon lui. La hausse de productivité observée dans certaines études se limiterait à des études de cas isolées du concept, sans comparaison directe avec la production conventionnelle. La méta-analyse de Leippert *et al.* (2020) confirme que les rendements ont tendance à être plus bas dans les systèmes à faible apport d'intrants (-19,2 % ; (Ponisio et al., 2015)) comparé aux systèmes conventionnels de référence. L'accroissement

de la diversité, qui crée des synergies, permet par contre de réduire significativement cet écart de rendement (angl. *yield gap*), et plusieurs auteurs mentionnent que cet élément n'est souvent pas pris en compte dans les études (Nicholls & Altieri, 2016; Ponisio et al., 2015). Ces résultats sont des analyses globales. Quand on se repositionne dans le contexte de l'ASS, l'agroécologie permettrait d'augmenter de 7-8 % les rendements dans les régions dites « sèches » (Leippert et al., 2020). Vu les rendements actuellement faibles, cette augmentation est cependant assez marginale.

Il existe aussi des problèmes de disponibilité et de qualité des matières organiques apportées sous forme d'amendements ou de paillage (angl. *mulch*). Il y a en effet des pertes nettes, dues aux exportations des récoltes, à compenser par de nouveaux apports. Les résidus de culture ont plusieurs valorisations alternatives : ils sont soit utilisés pour nourrir le bétail, vu sa grande valeur économique, soit utilisés comme combustible ou comme matériaux de construction, et soit enfouis dans le sol (Giller et al., 2009). Les résidus sont parfois encore brûlés, ce qui réduit le risque de transmission de maladies et facilite la préparation du sol, mais gaspille la matière organique et une partie des nutriments (Segnon & Achigan-Dako, 2014; Tanaka et al., 2013). De plus, selon Vanlauwe & Giller (2006), la matière organique ne suffit pas pour garantir la productivité, car elle apporte des fonctions différentes que les engrais minéraux, sa qualité varie et sa composition n'est pas en adéquation avec les ratios de nutriments requis par les plantes. L'utilisation d'engrais minéraux permet d'augmenter les rendements et donc la quantité de matière organique qui retourne au sol, et les éventuels problèmes d'acidification peuvent être corrigés par le chaulage. Quant aux problèmes d'eutrophisation en ASS, les auteurs proposent d'autres causes que l'utilisation excessive d'engrais minéraux. La matière organique peut aussi favoriser l'apparition ou la transmission de maladies ou de ravageurs, dans certains cas (Giller et al., 2009; Vanlauwe & Giller, 2006).

Les légumineuses, souvent promues à juste titre dans les systèmes de production agroécologiques pour leur capacité à fixer l'azote gazeux, comportent toutefois quelques désavantages. Contrairement à ce que l'on pense, elles ne fixent pas toutes de l'azote (en particulier dans la sous-famille des Caesalpinioideae, mais ça ne les empêche pas de parfois être bénéfiques pour la fertilité des sols). Les légumineuses ne sont pas non plus une source d'azote « gratuite » quand elles sont plantées comme engrais vert, car elles ont un coût en termes de travail et de terre. Finalement, la culture de légumineuses ne permet pas forcément d'améliorer la fertilité des sols (Vanlauwe & Giller, 2006). Par exemple, les variétés de soja à haut rendement, qui ont un indice de récolte d'azote élevé (87 % ; le ratio entre l'azote contenu dans les grains et l'azote total des parties aériennes de la plante), ont conduit à une perte d'azote nette dans la recherche de Toomsan *et al.* (1995).

2 L'agriculture familiale en Afrique subsaharienne

Avant d'aller plus loin, il est important de comprendre le type d'agriculture concernée par cette étude. Cette section aborde donc l'importance de l'agriculture familiale en ASS ainsi que quelques challenges et opportunités.

2.1 Définition et importance

Dans un premier temps, il est important de noter la distinction entre les concepts d'agriculture familiale (angl. *family farming*) et d'agriculture de petite taille (angl. *smallholder farming*), qui sont souvent confondus dans la littérature alors que leur importance et définition n'est pas la même (Lowder et al., 2019). Cependant, définir le concept d'agriculture familiale n'est pas évident car il varie en fonction des contextes. Garner & de la O Campos (2014) se sont penchés sur cette question en étudiant 36 définitions du concept provenant d'académiques, de sociétés civiles ou gouvernements, afin de mettre en exergue les éléments les plus caractéristiques. Ils ont ainsi défini l'agriculture familiale comme suit (Garner & de la O Campos, 2014, p.17, traduit de l'anglais) :

« L'Agriculture familiale est un mode d'organisation de la production agricole, forestière, halieutique, pastorale et aquacole qui est gérée et exploitée par une famille et qui repose principalement sur la main-d'œuvre familiale, tant féminine que masculine. La famille et l'exploitation agricole sont liées, co-évoluent et combinent des fonctions économiques, environnementales, reproductives, sociales et culturelles. »

Lowder et al. (2019) ont souligné qu'apporter une définition de l'agriculture de petite taille n'est pas non plus évident. Une exploitation agricole considérée comme « petite » en Amérique du Sud pourrait paraître « grande » en ASS. Certains auteurs utilisent la taille des cheptels ou encore l'importance économique des exploitations pour définir cette notion. Cependant, la majorité des scientifiques s'accordent sur une limite de 2 ha comme référence pour définir une exploitation agricole de petite taille (Lowder et al., 2019).

Durant la dernière décennie, les travaux de différents chercheurs ont permis d'améliorer considérablement nos connaissances sur l'ampleur de ces deux types d'agriculture à l'échelle mondiale, notamment en combinant les données de recensements agricoles et d'enquêtes auprès des ménages aux échelles nationales et régionales. Le dernier rapport de la FAO (2019) estime qu'il existe plus de 608 millions de fermes dans le monde. Parmi celles-ci, les fermes de petites tailles (moins de 2 ha) représentent 84 % du total, mais n'occupent que 12 % de la surface agricole totale. A l'inverse, 1 % des plus grandes fermes du monde occupent 70 % de la surface agricole. Ensuite, la FAO estime que plus de 90 % des exploitations peuvent être considérées comme familiales, et qu'elles opèrent sur 70 à 80 % de la surface agricole mondiale (Lowder et al., 2019). Ces chiffres illustrent l'importance de la distinction entre agriculture familiale et agriculture de petite taille. On estime que la première

permet de produire près de 77 % de l'alimentation mondiale, alors que la seconde produirait près de 36 % de cette alimentation. Sans cette distinction, il serait difficile de mettre en place des programmes politiques et de recherches scientifiques efficaces pour atteindre les Objectifs de Développement Durable (ODD) en 2030 (tels que les objectifs « faim zéro », « inégalités réduites », ...) (Lowder et al., 2019).

Bien que l'agriculture familiale et de petite taille en ASS aient quelques désavantages, comme les difficultés d'accès aux secteurs formels (de crédit, d'assurance ou de marché) ou la moindre productivité par unité de travailleur, elles comportent aussi une série d'avantages (Gollin, 2014). Parmi ceux-ci, on peut noter la plus grande flexibilité et le moindre coût lié à la main d'œuvre familiale (Gollin, 2014). Plusieurs auteurs mentionnent aussi la plus grande productivité par unité de surface (Gollin, 2014; Lowder et al., 2016).

Selon Sakho-Jimbira & Hathie (2020), au vu de l'importance numérique des exploitations familiales, de leur rôle dans la production alimentaire et dans la préservation de la biodiversité, ce type d'exploitation est essentiel pour le futur de l'agriculture africaine. Pour l'auteur, il est donc important d'aider à l'intensification durable de l'agriculture familiale. Après plus de 20 années de travail dans le développement de l'agriculture en ASS, Niyonkuru (2018, p.9) renchérit en affirmant que « l'agriculture familiale est le seul modèle qui génère des emplois, maintient la fertilité des terres, produit de la nourriture diversifiée, amortit les chocs liés aux aléas climatiques, aux maladies et à la volatilité des prix ».

L'ASS est la région en développement la plus grande du monde, couvrant une superficie de 24 millions de km² (Livingston et al., 2011). Avec une population totale de plus de 1,1 milliards d'humains (The World Bank, 2019), c'est aussi une des régions avec la plus grande croissance (Livingston et al., 2011). Les Nations-Unies (2019) prédisent une population de plus de 2,1 milliards en 2050 et près de 3,8 milliards en 2100. Ainsi, la croissance de la population d'ASS pourrait représenter plus de la moitié de la croissance mondiale entre 2019 et 2050 et celle-ci doit s'accompagner d'une croissance de la production alimentaire afin de satisfaire l'ODD 2 des Nations-Unies : « Zéro faim » (Sakho-Jimbira & Hathie, 2020). Selon Shimeles et al. (2018) l'augmentation de la productivité agricole, en plus de soutenir l'augmentation de la population, devrait aider à la transformation et la croissance économique en permettant le développement d'autres secteurs, en aidant au développement de la chaîne d'approvisionnement agricole et en aidant à l'accès à des marchés plus grands.

2.2 Challenges et opportunités

L'agriculture joue un rôle important en ASS. En 2016, elle employait 52 % de la population et générait 20 % du PIB (Global Economy, 2019, cité dans Kim *et al.*, 2021). En plus de cette main d'œuvre agricole importante, l'ASS dispose de la plus grande surface de terres arables non-cultivées au monde. Il y a donc un potentiel de croissance important (Kanu et al ; 2014, cité dans Shimeles *et al.*, 2018). Malgré cela, le taux de sous-nutrition de la région, estimé à 23 % par la FAO en 2015, reste le plus haut au niveau mondial (Shimeles et al., 2018).

Selon Shimeles *et al.*, (2018), l'ASS fait face à différents défis pour nourrir sa population. Tout d'abord, il y a un défi de genre. Aujourd'hui, bien qu'elle représente 47 % de la main d'œuvre agricole (en ASS), la femme n'a pas accès au financement aussi facilement que les hommes et les droits de propriétés des terres leurs sont souvent défavorables. Cette discrimination empêcherait la femme d'être aussi productive que l'homme. Selon la FAO (2011), si les femmes avaient accès aux mêmes ressources que les hommes, les rendements agricole pourraient augmenter de 20 à 30 % (pour les exploitations gérées par des femmes) et ainsi réduire de 100 à 150 millions le nombre de personnes souffrant de la faim dans les pays en développement. D'autres études montrent que l'émancipation des femmes permettrait d'atteindre d'autres objectifs de développement que l'augmentation de productivité (Sharaunga *et al.*, 2015). Cela améliorerait notamment l'éducation et la santé des ménages, car les femmes auraient tendance à investir une plus grande partie de leur revenu dans ces domaines (Gonzales *et al.*, 2015).

Ensuite, vient le défi de la dépendance aux cultures pluviales. Selon Moyo *et al.* (2015, cité dans Shimeles *et al.*, 2018), le faible investissement dans les systèmes d'irrigation, et donc la dépendance aux pluies pour les cultures de base, explique la faible productivité du milieu agricole. En 2003, lors de la Déclaration de Maputo, les états africains s'engagèrent à allouer chaque année 10 % de leur budget pour soutenir le secteur agricole et notamment pour améliorer la gestion de l'eau. Cependant, très peu de pays ont atteint cette cible et la moyenne est estimée à 6 % (Pernechele *et al.*, 2021).

Enfin, la dégradation des terres (angl. *land degradation*) et les dérèglements climatiques sont deux autres défis qui vont de pair. Les dérèglements climatiques rendent la gestion des cultures de plus en plus imprévisible alors que la région était déjà la plus sensible au monde face aux événements climatiques extrêmes (Kotir, 2011; Shimeles *et al.*, 2018). Selon le Africa Group of Negotiators Experts Support (AGNES, 2020, cité dans Sakho-Jimbira & Hathie, 2020), la dégradation des terres est principalement due à des facteurs climatiques et anthropiques. Les premiers incluent des changements de températures, de précipitations et la distribution et intensité des événements climatiques extrêmes ; alors que les seconds incluent notamment les pratiques agricoles telles que des mauvaises pratiques de gestion de l'eau ou de fertilisation. La déforestation et le surpâturage sont aussi souvent citées comme cause de dégradation (Vlek *et al.*, 2010), bien que leur ampleur soit parfois remise en question (Kiage, 2013).

Il y a aujourd'hui un besoin d'adaptation, autant à l'échelle des systèmes qu'à l'échelle de la ferme, pour faire face aux défis de l'agriculture en ASS (Kotir, 2011). Dans le livre "Building a Resilient and Sustainable Agriculture in Sub-Saharan Africa" (Shimeles *et al.*, 2018), plusieurs solutions, basées sur la littérature scientifique, sont proposées pour faire face aux défis du changement climatique. Notamment, Ouiminga (2018) montre que la combinaison de bonnes pratiques de gestion de l'eau et de la fertilité (via l'apport de fumier mais aussi

d'urée et de NPK) permettent une bonne adaptation aux dérèglements climatiques, tout en restant financièrement intéressant pour les exploitants. Dans leur rapport « The future of agriculture in Sub-Saharan Africa », Sakho-Jimbira & Hathie (2020) insistent aussi sur l'importance d'accroître le taux de matière organique dans les sols (en combinaison avec l'utilisation de fertilisant inorganique, dans une logique de gestion intégrée) afin d'augmenter la résilience des exploitations. Bien qu'elles ne soient pas décrites comme telles par les auteurs, ces pratiques peuvent être vues comme « agroécologiques » au regard des principes évoqués à la section précédente (I.1).

Bien que l'agriculture en ASS soit confrontée à une diversité de défis, dans le cadre de ce travail, nous nous concentrerons sur le problème de la disponibilité en matières organiques pour pallier le manque de productivité des systèmes et augmenter leur résilience.

3 Cartographie par télédétection

Depuis 1960 et le premier lancement d'un satellite d'observation de la terre (TIROS 1), la géomatique a grandement évolué et s'est imposée dans beaucoup de domaines scientifiques comme la météorologie, l'environnement, l'agriculture et la gestion de catastrophes (ESA, 2009a). La géomatique englobe principalement deux domaines ; la télédétection et les systèmes d'informations géographiques (SIG). La télédétection est l'acquisition à distance des propriétés physiques de surfaces de la terre, en mesurant les rayonnements émis, réfléchis ou diffractés. Les SIG sont les techniques et méthodes utilisées pour traiter ces données (ESA, 2009b; Manson et al., 2015).

3.1 Systèmes de télédétection

En fonction des besoins et de l'évolution des technologies, différents systèmes de télédétection se sont développés (Manson et al., 2015). Les systèmes diffèrent principalement par leur résolution (spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle), leur type de capteur (actif ou passif), leur orbite (entre autres géostationnaire ou héliosynchrone), et leur largeur de fauchée (Belspo, 2003; ESA, 2009b).

Selon l'Union of Concerned Scientists (2022), 4852 satellites sont actuellement en orbite autour de la terre. Certaines missions de satellites sont particulièrement adaptées à la surveillance des terres. Parmi celles-ci, le programme de l'Union européenne pour l'observation et la surveillance de la Terre « Copernicus » est entré en phase opérationnelle en 2014. La particularité de ce programme est que toutes ses données sont libres, et donc accessibles gratuitement pour tous les utilisateurs publics ou privés. Sa mission Sentinel-2 (S2), en plus de la mission Sentinel-1, est spécialement prévue pour la surveillance des terres. Composée de deux satellites, elle comporte des imageurs multispectraux fonctionnant dans 13 bandes, du visible au moyen infrarouge. La résolution spatiale de ses bandes varie de 10 à 60 m. Sa largeur de fauchée est 290 km de large. Grâce à ses deux satellites, son temps de revisite est de 5 jours (Copernicus, s. d.; ESA, 2015). Etant donné ces caractéristiques, les

missions Sentinel-1 et Sentinel-2 ont été utilisées dans de nombreuses recherches portant sur la surveillance des terres (Abdi, 2020; Battude et al., 2016; Delhez, 2019; Dupuy et al., 2020; Fan et al., 2021; Frampton et al., 2013; Goffart et al., 2021; Lambert, 2018).

Le satellite IKONOS, lancé en 1999, a été le premier satellite commercial avec une très haute résolution spatiale (VHR). Sa bande panchromatique avait une résolution de 1 m et ses bandes multispectrales avaient une résolution de 4 m. Il a cessé de fonctionner en 2015, et a été suivi par les satellites WorldView, GeoEye-1 et QuickBird, tous opérés par Maxar (Satellite Imaging Corp, s. d.).

Les capteurs MODIS, embarqués sur les satellites TERRA et AQUA, jouent aussi un rôle important dans l'observation des terres. Ils possèdent 36 bandes spectrales, avec des résolutions spatiales allant de 250 m à 1 km (Savtchenko et al., 2004). Finalement, les satellites de la mission SPOT et du programme Landsat font aussi partie des satellites les plus utilisés pour la surveillance des terres (Satellite Imaging Corp, s. d.).

Le choix du système de télédétection demande donc de faire des compromis. Par exemple, une plus grande largeur de fauchée conduira généralement à une diminution de la résolution spatiale (Applisat, s. d.).

3.2 Classification des occupations du sol

De nombreux programmes d'observation de la terre (angl. *earth observation programmes*) et études classifient les occupations du sol (angl. *land cover (LC)*) en utilisant différentes méthodologies et pour atteindre différents objectifs.

Le projet « ESA GlobCover » fut le premier à produire une carte globale de l'occupation du sol à 300 m, nommée « GlobCover 2005 » et sortie en 2008 avec la collaboration de l'UCLouvain. Elle utilise les séries temporelles de MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument). La « GlobCover 2009 », produite en utilisant des séries temporelles MERIS de 2009 uniquement, fut déjà publiée en 2010, démontrant ainsi le fonctionnement de la chaîne de traitement automatique « GlobCover ». La légende utilisée est la LCCS (Land Cover Classification System) des Nations Unies (ESA et al., 2011).

La série temporelle de cartes d'occupation du sol du programme « Climate Change Initiative (CCI) » de l'ESA fut quant à elle la première à intégrer une dimension temporelle dans la surveillance de l'occupation du sol. L'évolution de l'occupation du sol étant une variable importante pour la surveillance du climat, les cartes ont été produites pour chaque année entre 1992 et 2020, toujours avec une résolution de 300 m et avec les 22 classes de la légende LCCS. Ces cartes furent créées par un consortium dirigé par l'UCLouvain (ESA, 2017).

Récemment, des cartographies globales de l'occupation du sol à 10 et 30 m ont été réalisées. L'ESA a réalisé « WorldCover 10m » en 2020, à partir des images Sentinel-1 et 2. Esri a réalisé le « Esri 2020 landcover » à 10 m et avec les images Sentinel-2. La Chine a réalisé « GlobeLand30 », à 30 m et également en 2020.

Les méthodes de classification

Différentes méthodes de classification ont été utilisées pour cartographier l'occupation du sol à partir de données de télédétection. On distingue les algorithmes supervisés ou non. Les algorithmes non-supervisés comme ISODATA ou K-means fonctionnent sur des données où les classes ne sont pas déterminées à priori. Les algorithmes supervisés comme le maximum de vraisemblance, les réseaux de neurones artificiels ou les méthodes d'ensemble, fonctionnent avec des classes déterminées à priori par l'utilisateur.

L'algorithme Random Forest (RF) est un algorithme de machine learning supervisé beaucoup utilisé depuis quelques années pour classifier l'occupation du sol. Cet algorithme de classification a été proposé par Breiman (2001) et repose sur un ensemble d'arbres de décision indépendants. Chaque arbre de décision va être entraîné sur un sous-ensemble aléatoire (d'où le « *random* ») des données et va voter pour la classe la plus probable. La classe finale est déterminée sur base d'un vote majoritaire des arbres. Le fait de combiner le résultat de ces arbres (d'où le nom « *forest* ») va permettre d'obtenir un vote final plus fiable et de limiter l'erreur de généralisation (Breiman, 2001). De nombreuses études ont analysé et comparé les performances de cet algorithme et ont conclu qu'il était souvent le plus performant dans le cadre de la classification d'occupations du sol. Ses avantages sont nombreux ; en plus d'obtenir des résultats avec une bonne exactitude, il fonctionne de manière efficiente sur de larges bases de données car il demande moins de puissance de calcul que d'autres méthodes de classification. Il peut utiliser beaucoup de variables, estimer l'importance de chacune dans la classification et le choix des différentes variables peut intervenir pour chaque discrimination entre deux classes. Il est robuste aux valeurs aberrantes et au bruit. Finalement, il est aussi facile à implémenter car il requiert le choix de seulement deux paramètres (le nombre d'arbres et de variables) (Belgiu & Drăguț, 2016; Chan & Paelinckx, 2008; Gislason et al., 2006; Pal, 2005; Rodriguez-Galiano et al., 2012; Sluiter & Pebesma, 2010).

L'algorithme RF fut par exemple utilisé au Burkina Faso pour cartographier la couverture forestière puis la biomasse aérienne associée (Karlson et al., 2015), pour classifier les types de forêts au Congo en combinant des données optiques et SAR (Delhez, 2019), pour détecter des espèces invasives en Slovénie (Dorigo et al., 2012), pour classifier les types de cultures en Chine (Fan et al., 2021), ou pour classifier les cultures à partir de données Sentinel-2A au Mali (Lambert, 2018). Les images Pléiades furent aussi classifiées avec l'algorithme RF pour cartographier les types de végétations sur plusieurs îles algériennes (Hamimeche et al., 2021) ou pour cartographier les espèces végétales dans les pâturages colonisés par les chiens de prairie aux États-Unis (Brennan et al., 2020).

La plupart des études se basent sur des approches de classification par pixel, qui traitent chaque pixel individuellement. Plus récemment, l'approche de classification par objet s'est développée, car avec l'augmentation de la résolution spatiale des systèmes de télédétection, les objets ne sont maintenant plus composés d'un seul ou de moins d'un pixel, mais de

plusieurs pixels (Blaschke, 2010). En utilisant l'analyse d'image basée sur les objets (angl. *Object-Based Image Analysis*), on peut s'affranchir de certains problèmes inhérents aux méthodes basées sur les pixels, dus à l'hétérogénéité des pixels et à la variabilité du couvert au sein d'une même classe de végétation (Peña-Barragán et al., 2011). Cette méthode a entre autres été utilisée pour cartographier l'occupation du sol de l'île de la Réunion (Dupuy et al., 2020), pour classifier les types de forêts au Congo (Delhez, 2019) ou pour classifier des cultures aux États-Unis (Peña-Barragán et al., 2011).

L'analyse par télédétection de l'agriculture de petite taille en Afrique est compliquée par la petite taille des champs, les associations de culture, l'hétérogénéité des pratiques culturales, les différences dans les cycles de cultures, la présence fréquente d'arbres et la couverture nuageuse durant la saison des pluies (Lambert, 2018; Vancutsem et al., 2013; Verhegghen et al., 2014). L'évolution rapide des technologies de télédétection (meilleures résolutions spatiales et temporelles) lève toutefois certaines contraintes, ouvre de nouvelles perspectives, et permet d'obtenir des résultats satisfaisants pour l'agriculture de petite taille en Afrique (Atzberger, 2013; Lambert, 2018).

Les signatures spectrales

Les différents types d'occupation du sol peuvent être discriminés grâce à leurs signatures spectrales différentes. Les signatures spectrales sont la combinaison des rayonnements électromagnétiques émis, réfléchis et absorbés à différentes longueurs d'onde. Les différentes occupations de sol possèdent des réflectances différentes en fonction des longueurs d'ondes et ont donc des signatures spectrales différentes. Par exemple, la végétation verte absorbe beaucoup dans les longueurs d'onde visibles (mais un peu moins le vert, d'où sa couleur verte) et reflète beaucoup le proche infrarouge (Figure 2 ; Belspo, 2018).

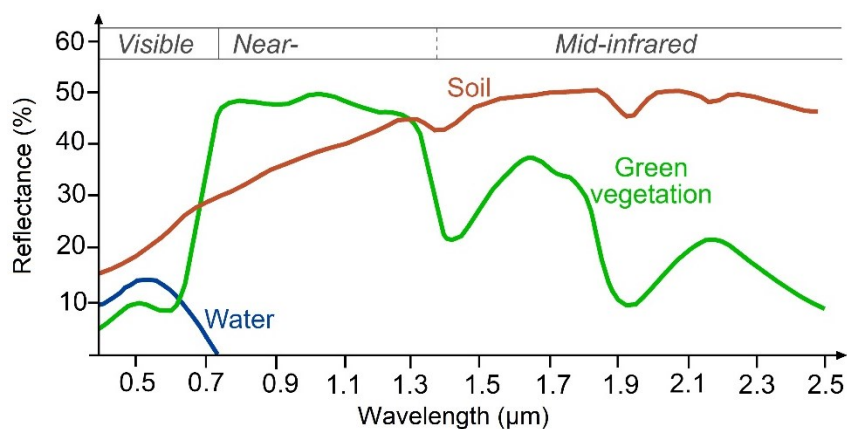


Figure 2 – Signatures spectrales typiques de l'eau, du sol nu, et de la végétation verte (seos-project.eu).

Les indices

Les indices spectraux sont formés en faisant des opérations mathématiques (principalement des soustractions et divisions) entre les différentes bandes spectrales d'une image. Ces indices permettent de mieux discerner les classes d'occupation du sol et aident donc à la classification (Richards & Jia, 2006). Ils sont divisés en plusieurs types : les indices de végétation (NDVI¹, SAVI², ...), de sol (BI³), d'eau (NDWI⁴),... (Belspo, s. d.; IDB, s. d.). L'indice de texture est quant à lui créé en analysant la relation entre les pixels adjacents d'une bande, ce qui permet d'en extraire des caractéristiques de texture. La texture traduit l'agencement plus ou moins régulier d'alternance de niveau du signal (Jiang et al., 2015). Une méthode pour le calcul de l'indice de texture, proposée par Haralick en 1973 et utilisée par Dorigo et al. (2012) ou Peña-Barragán et al. (2011), calcule les caractéristiques de texture à l'aide de la matrice de co-occurrence des niveaux de gris (angl. *gray-level co-occurrence matrix*) en enregistrant la fréquence d'apparition de paires de pixels adjacents ayant des valeurs spécifiques dans une image (Haralick et al., 1973). Finalement, un modèle numérique de terrain ou d'élévation est parfois ajouté à la liste de variables de la classification (Dupuy et al., 2020).

3.3 Les estimations de biomasse

La télédétection permet également d'évaluer la biomasse aérienne (angl. *aboveground biomass (AGB)*) de la végétation. La méthode se base sur la corrélation entre un indice de végétation (p. ex. le NDVI) avec des mesures de quantité de biomasse sur le terrain. Appliquer un modèle (p. ex. une régression linéaire) entre ces deux variables permet de prédire la biomasse aérienne. Certains auteurs ont utilisé le NDVI avec une régression linéaire (Battude et al., 2016; Bogo et al., 2017; Dardel et al., 2014), certains le STI⁵ ou le LAI⁶ avec une régression linéaire (Jacques et al., 2014; Lambert, 2018), et d'autres ont comparé différents modèles combinés à différents indices de végétation ou d'autres variables (Goffart et al., 2021; Karlson et al., 2015).

Pour les arbres isolés, une autre méthode est de détecter les arbres individuellement avec des images à très haute résolution. En connaissant l'angle du soleil et du satellite lors de la prise de vue, il est possible de mesurer leur surface de couronne et leur hauteur, pour ensuite établir une relation allométrique et déterminer la biomasse foliaire ou aérienne (Brandt et al., 2020; Franklin & Hiernaux, 1991).

¹ Normalized Difference Vegetation Index

² Soil Adjusted Vegetation Index

³ Brightness Index

⁴ Normalized Difference Water Index

⁵ Soil Tillage Index

⁶ Leaf Area Index

4 Nutriment et gestion de la fertilité des sols

Cette section présente en premier lieu l'état de la fertilité des sols en ASS. Ensuite, la controverse autour de l'apport d'azote et de phosphore est discutée. Finalement, la méthode des bilans de nutriments est décrite de manière détaillée. Le lecteur qui le désire trouvera un rappel de l'importance des nutriments en agronomie dans l'annexe 2.

4.1 Fertilité des sols en ASS

En ASS, la gestion de la fertilité des sols est rendue difficile par leur haut niveau d'altération⁷ et/ou d'épuisement. Cette pauvre fertilité serait la cause majeure de la faible production agricole (Jaetzold & Schmidt, 1982 ; Stoorvogel et al. 1993, cités dans Wairegi & van Asten, 2013). Pour tenter de résoudre ce problème, l'équipe de Middendorf et al. (2017) a interrogé 491 chercheurs travaillant dans la gestion de la fertilité en ASS (principalement en Afrique de l'Est (37 %), de l'Ouest (35 %), des Grands Lacs (20 %) et en Ethiopie (8 %)). Une série de questions leur a été posée pour mieux comprendre les problèmes fréquemment rencontrés en termes de fertilité, les solutions potentielles, les barrières (sociotechniques, financières, etc.) et d'éventuelles stratégies pour surpasser ces barrières. Des équipes d'experts multidisciplinaires (agronome, sociologue, secteur privé, organisation paysanne, etc.) se sont ensuite réunies pour établir une liste des facteurs les plus limitants pour l'augmentation de la productivité, et pour réfléchir à la mise en place de stratégies pour outrepasser ces barrières. Selon les auteurs, le problème de fertilité de la région est complexe et ne peut être réglé par un seul facteur. Une approche intégrée est nécessaire pour prendre en compte les aspects socioéconomiques, politiques et biophysiques.

Pour l'ensemble de l'échantillon (toutes régions d'ASS confondue), l'analyse de Middendorf et al. (2017) montre que les facteurs les plus limitants en termes de caractéristiques du sol sont les carences en N et en P, l'acidité des sols et la faible teneur en C organique des sols. En termes de limitations biophysiques, ce qui ressort est le manque d'accès à des tests de qualité du sol, aux fertilisants synthétiques, ainsi qu'un manque de recommandations adaptées d'application d'engrais. Certaines régions ont aussi évoqué la gestion des résidus de cultures et la disponibilité en MO de qualité comme étant des barrières. Enfin, en termes de limitations socioéconomiques et socioculturelles, l'accès aux ressources financières est la principale limitation, surtout pour les exploitations de petites tailles et l'agriculture de subsistance (Pierzynski et al., 2017). Pour répondre à ces limitations, les

⁷ Pour rappel, l'altération est un processus naturel durant lequel un matériel parental va être dégradé (chimiquement ou physiquement) pour former un sol. Au fur et à mesure, des minéraux et nutriments sont libérés par les réactions chimiques. Ce processus est influencé par différents facteurs comme le régime hydrique (pluie/évapotranspiration) et la température. En ASS, ces deux facteurs sont souvent très élevés, ce qui accélère considérablement la vitesse d'altération (University of Houston, s. d.). Aujourd'hui, les sols des régions tropicales sont donc généralement plus pauvres en minéraux et nutriments que les sols des régions tempérées. Ils contiennent aussi plus d'oxydes de fer et sont plus acides, ce qui n'est pas favorable au développement des plantes (Jones et al., 2013).

experts ont ensuite émis des recommandations. Elles ont été regroupées en quatre thèmes prioritaires (Stewart et al., 2017, p.5, traduit de l'anglais) :

- « *Renforcement des systèmes de fertilisation inorganique*
- *Accès et utilisation accrues de matières organiques de qualité*
- *Renforcement des capacités de transfert de connaissances tout au long de la chaîne de valeur*
- *Renforcement des systèmes d'exploitation agricole par le biais de facteurs biophysiques et socioéconomiques »*

Selon Stewart et al. (2017), ces thèmes devraient être traités de manière simultanée pour répondre au problème de la fertilité des sols en ASS. Il est donc nécessaire que chaque partenaire actif dans ces domaines s'engage à collaborer avec tous les secteurs (politique, ONG, chercheurs, services d'éducation et de vulgarisation, etc.).

4.2 Azote et phosphore, la controverse

Comme le montrent les sections précédentes, l'azote et le phosphore sont deux éléments importants pour la vie sur Terre. Pour répondre au besoin croissant de sa population, l'Homme a su tirer parti de ces deux éléments. L'augmentation de la production alimentaire du dernier siècle est en partie due à la capacité de l'Homme à extraire des ressources de N et P pour l'agriculture. Les exemples les plus connus sont la production d'azote via le procédé Haber-Bosch et l'utilisation de roches phosphatées (Zhang et al., 2020). Erisman et al. (2008, cité dans Zhang et al. 2015) estiment que plus de la moitié de la population du monde est nourrie avec des plantes ayant reçu une fertilisation azotée synthétique.

Cependant, cette utilisation intensive de N et P dans l'agriculture et les autres activités humaines auraient largement dérégulé le cycle de ces nutriments. Ceux-ci sont influencés par de nombreux facteurs (biotiques et abiotiques), ce qui complique la gestion de leur stock dans le sol (IFA, 2016). Sur l'ensemble de la production de N et P, plus de 90 % serait dédiée à la production agricole (Cordell et al., 2009 ; Fowler et al., 2013)⁸. Selon Fowler et al. (2013)⁸, la quantité d'azote réactif ajoutée par l'Homme dans le système Terre a été multipliée par neuf en moins de 100 ans, dépassant ainsi la capacité de fixation naturelle terrestre et océanique. Actuellement, les taux d'application globaux de N et P sont estimés à environ 180 et 15 Tg P an⁻¹ respectivement. C'est bien au-delà des limites planétaires définies par Steffen et al. (2015,

Figure 3), ce qui signifie que le système Terre pourrait être déstabilisé dans son fonctionnement. D'une part, les excès de N et P atteignant les eaux de surface peuvent mener à des processus d'eutrophisation. D'autre part, l'excès de N peut être relâché dans l'atmosphère sous forme de N₂O, un GES 300 fois plus puissant que le CO₂ (Steffen et al.,

⁸ Cité dans Zhang et al., 2020

2015). À cela s'ajoute la production de CO₂ due à la confection des engrais synthétiques. Celle-ci requiert de l'énergie (souvent une énergie fossile) et une source d'hydrogène (souvent le CH₄). Ainsi, la production d'une tonne d'ammoniac produirait aussi 0,7 tonne d'équivalents carbone (CO₂-C, c.-à-d. 2,6 tonnes de CO₂ gaz ; Jenkinson, 2001)⁹.

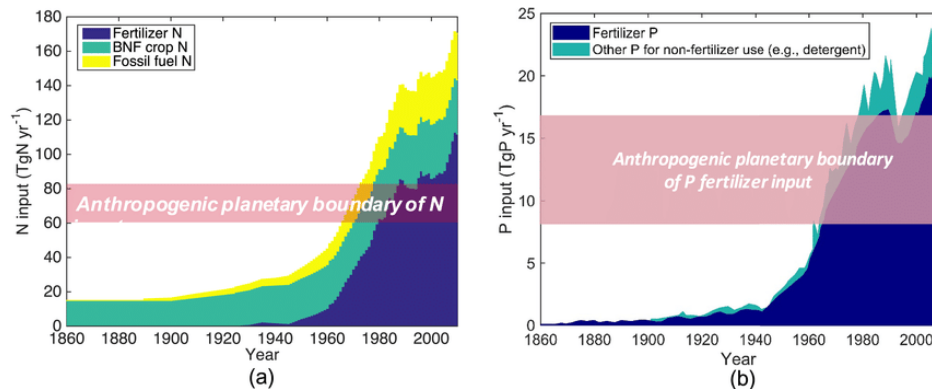


Figure 3 – Apports d'azote (a) et de phosphore (b) des activités humaines au système terrestre. Les données relatives aux apports de N et de P proviennent respectivement de Holland et al. (2005) et de Cordell et al. (2009). Les limites planétaires anthropiques des apports d'engrais N et P proviennent de Steffen et al. (2015) et Springmann et al. (2018). BNF : Fixation biologique de l'azote. La zone verte de la figure 1b désigne le P produit à partir de roches phosphatées pour un usage non fertilisant. (Zhang et al., 2020).

Il convient donc d'utiliser les engrais N et P de manière raisonnée, car leurs apports en excès sont nuisibles à notre environnement. Toutefois, la section précédente (4.1) a montré que cet excès d'azote à l'échelle globale ne reflète pas la réalité de toutes les régions du monde. Certaines régions, comme l'ASS, ne présentent pas d'excès (Steffen et al., 2015, Figure 4) et ont toujours besoin de plus de macronutriments pour régler les problèmes de fertilité des sols (Zhang et al., 2020). Selon Chianu et al. (2012), des événements de pollution par les nutriments ne se sont pas encore produits dans la majeure partie de l'Afrique, mais il faut rester à l'affût des signes précurseurs lors des activités de promotion des engrais, d'autant plus que les sols d'ASS retiennent moins bien les nutriments que la moyenne de par leur faible capacité d'échange cationique (Niyonkuru, 2019).

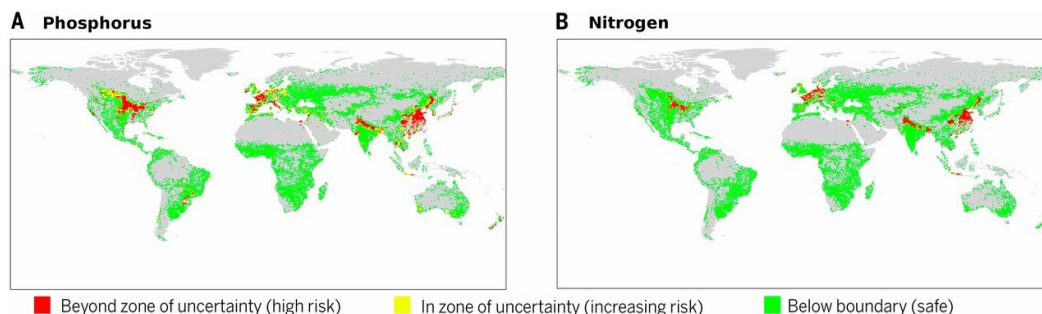


Figure 4 – Distributions sous-globales et état actuel des variables de contrôle pour (A) les flux biogéochimiques de P et (B) les flux biogéochimiques de N. Sur chaque carte, les zones vertes sont à l'intérieur de la limite planétaire (sans danger), les zones jaunes sont à l'intérieur de la zone d'incertitude (risque croissant) et les zones rouges sont au-delà de la zone d'incertitude (risque élevé). Les zones grises sont celles où les engrais P et N ne sont pas appliqués (adapté de Steffen et al., 2015).

⁹ Un kilogramme de CO₂ contient près de 273 grammes de carbone, donc 1 éq. CO₂ ≈ 0,273 éq. C

4.3 Bilan de nutriments

4.3.1 Concept et historique

Pour faire face à ces problèmes de déséquilibre en nutriments, de nombreux auteurs recommandent l'utilisation de bilans de nutriments (BN, angl. *nutrient budget*) (Alley & Vanlauwe, 2009; Chianu et al., 2012; EDF, 2020; IFA, 2016; Zhang et al., 2015, 2020). L'idée du BN est de quantifier les nutriments entrants (les intrants, Nu_{inputs}) et sortants (les extrants, $Nu_{outputs}$) d'un système donné en se basant sur le principe de conservation de la masse. Si l'on considère aussi les extrants de production ($Nu_{prod-output}$) et les pertes (Nu_{losses}), la différence totale quantifie la variation du stock de nutriments - Nu ; Eq.(1) - du système (Zhang et al., 2020, Figure 5).

$$Nu = Nu_{inputs} - Nu_{prod-outputs} - Nu_{losses} \quad (1)$$

Selon Alley & Vanlauwe (2009) « un agroécosystème est considéré comme le plus durable lorsque les apports en nutriments sont en équilibre avec les sorties de nutriments à un niveau optimal de production végétale pour un endroit donné ». On peut ainsi définir deux concepts clés : d'une part le *Nutrient Use Efficiency - NuUE*, Eq. (2.a) - exprimé comme la fraction de nutriments exportés comme produits de récolte. Et d'autre part le *Nutrient Surplus - Nu_{sur}* ; Eq. (2.b), exprimé comme la différence entre les intrants et les produits de récolte, ou comme la différence entre les pertes et la variation du stock (Zhang et al., 2020).

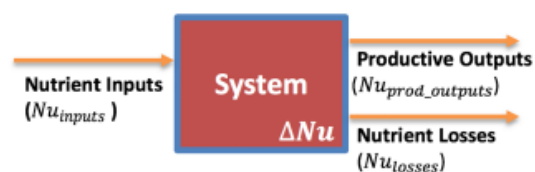


Figure 5 – Schéma du bilan de nutriment d'un système. Les "extrants productifs" comprennent les éléments nutritifs récoltés et retirés du système, tels que les cultures, la paille et les produits pour animaux, qui sont généralement des produits de valeur économique (Zhang et al., 2020).

$$NuEU = Nu_{prod-outputs} / Nu_{inputs} \quad (2.a)$$

$$NuSur = Nu_{inputs} - Nu_{prod-outputs} = Nu_{losses} + Nu \quad (2.b)$$

Dans le cadre des programmes de gestion de l'azote, le *Nitrogen Use Efficiency (NUE)* est considéré comme l'indice le plus efficace pour accroître la productivité des cultures tout en limitant les dommages à l'environnement. Il a été accepté par 193 pays pour devenir un des indicateurs de progrès pour les ODD (Zhang et al., 2020).

La notion de BN est apparue vers la moitié du XIX^e siècle quand des scientifiques européens ont pour la première fois quantifié l'azote dans les eaux de pluies et de drainage sur des parcelles agricoles (Boussingault, 1841 ; Lawes, 1882)⁸. Par la suite, les bilans ont été étendus, incluant d'autres intrants et extrants ainsi que d'autres nutriments. Inquiétés par la durabilité de la production alimentaire des USA, Lipman & Conybeare (1936) ont établi un BN pour l'entièreté des terres agricoles du pays. Vers le milieu du XX^e siècle, le monde scientifique

a pris conscience des phénomènes d'eutrophisation et du rôle des excès de nutriments dans ceux-ci. Pour mieux cerner ce problème, on utilisa alors des BN à l'échelle des bassins versants (Howarth et al., 1996 ; Lowrance et al., 1985 ; Robertson, 1986 ; Viets, 1971)⁸. Mais ces bilans ne sont pas seulement utiles pour les systèmes agricoles, les travaux de Bormann et Likens (1979)⁸ et plus récemment ceux de Groffman et al. (2018)⁸ ont notamment permis d'en apprendre plus sur les nutriments dans les écosystèmes forestiers.

Aujourd'hui, les BN sont donc appliqués pour toute une série de raisons et dans différents domaines. Quatre motivations principales ont été identifiées (Zhang et al., 2020, p.4, traduit de l'anglais) :

1. « identifier et quantifier les sources ou les puits de nutriments manquants (par exemple, Crutzen et al., 2008 ; Davidson, 2009) ;
2. évaluer l'efficacité de l'utilisation des nutriments dans une système, tel que le système de production végétale et animale ou le système alimentaire dans son ensemble (Bai et al., 2018 ; Bouwman, Goldewijk, et al., 2013 ; EUNEP, 2015 ; Lu et al., 2019 ; MacDonald et al., 2011 ; Quemada et al., 2020 ; Zhang, Davidson, et al., 2015) ;
3. évaluer les impacts environnementaux des pertes de nutriments d'un système, comme l'estimation des émissions de N₂O [...] (Bodirsky et al., 2012; de Vries et al., 2011 ; Thompson et al., 2019 ; Tian et al., 2019) ou l'exportation fluviale d'azote des bassins versants [...] (Howarth et al., 2012) ;
4. informer les parties prenantes, telles que les agriculteurs et les décideurs politiques, sur les performances de la gestion des nutriments et identifier comment la productivité de l'utilisation des nutriments peut être améliorée et la pollution réduite (Davidson et al., 2016 ; McLellan et al., 2018). »

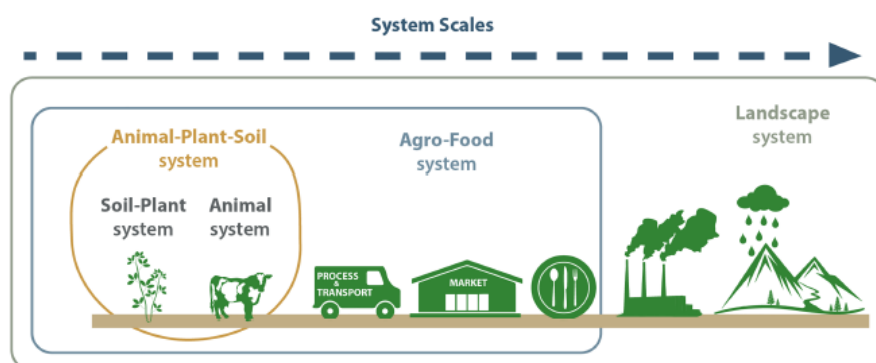


Figure 6 – Illustration des échelles de système utilisées pour quantifier les bilans de nutriments. La définition des échelles du système est développée à partir de Li et al (2019). Les échelles du système définissent les éléments clés qui seront examinés à l'intérieur d'une limite physique (c'est-à-dire une échelle spatiale). Par exemple, dans un bassin versant, l'évaluation du bilan nutritif peut se concentrer sur la production végétale uniquement (c'est-à-dire un type de système sol-plante), inclure la production animale (c'est-à-dire un système animal-plante-sol), ou inclure l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement alimentaire (c'est-à-dire un système agroalimentaire), ou toutes les autres activités humaines qui induisent des apports d'azote dans le paysage, comme la combustion de combustibles fossiles (c'est-à-dire un système paysager) (Zhang et al., 2020).

4.3.2 Difficulté dans la définition des BN

La définition des différentes échelles

Au vu de leur intérêt, de nombreux BN ont été réalisés à différentes échelles de systèmes et d'espaces. Selon Zhang et al. (2020), chaque échelle peut être divisée en sous-catégories. Pour l'échelle spatiale, on parlera de bilan au niveau de la parcelle, de l'exploitation, et du bassin versant, national et global. Les systèmes quant à eux sont divisés en cinq catégories : sol-plante, animal, animal-sol-plante, agroalimentaire ou paysage (Figure 6). À cela s'ajoute souvent l'échelle temporelle, pouvant aller d'une saison de culture à plusieurs années. Cette diversité rend la comparaison inter-bilan difficile et les conclusions parfois contradictoires.

L'approche sol-plante (Figure 7 a) est souvent utilisée pour évaluer l'efficacité de la gestion des nutriments. Zhang et al. (2020) rapportent deux défis principaux pour cette approche : premièrement, le calcul du NuUE est basé sur l'hypothèse de stabilité du stock de nutriments (Nu est nul ou négligeable par rapport aux autres termes). Or, cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée, surtout dans le cas de rotations de cultures ou de stocks de nutriments importants. En effet, le taux de minéralisation de la matière organique n'est pas toujours égal au taux d'immobilisation des nutriments par le sol. Deuxièmement, l'inclusion ou non des résidus de culture dans les « extrants de production » influence grandement la mesure d'efficacité. Il convient donc de se renseigner sur les pratiques agricoles afin de « classer » ces résidus correctement.

L'ajout de la composante « animale » au système sol-plante permet d'intégrer l'alimentation animale produite localement, par le pâturage et les résidus de cultures, et le fumier recyclé, via l'application d'engrais organique sur les cultures. Ces deux éléments peuvent alors être vus comme des processus internes au système (Figure 7 c). Cependant, la frontière entre le fumier considéré comme exporté et la nourriture considérée comme importée n'est pas facile à définir alors qu'elle influence le bilan. La variabilité dans la prise en compte de ce genre de facteurs rend les comparaisons difficiles (Zhang et al, 2020).

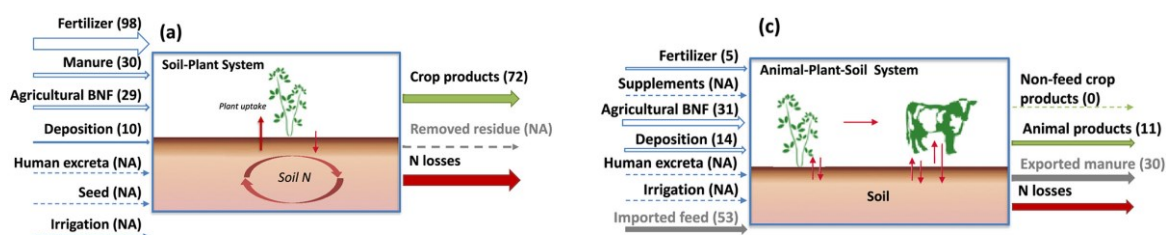


Figure 7 – Exemples des principaux intrants et extrants productifs des cinq systèmes. Les chiffres entre parenthèses sont l'estimation de chaque terme budgétaire pour l'azote à l'échelle mondiale avec l'unité de Tg N an⁻¹. "NA" indique que l'estimation n'est pas disponible pour le terme budgétaire dans cet exemple. Les estimations sont basées sur Billen et al. (2014), avec des modifications mineures (adapté de Zhang et al., 2020).

La quantification des termes du bilan

Les cycles complets de nutriments impliquent de nombreux compartiments et de nombreuses interactions. Un rappel de l'ensemble du cycle du N et P est donné en annexe à la Figure 43. Zhang et al. (2020) identifient une série d'éléments à considérer lors de la réalisation d'un BN :

- Fertilisants synthétiques
- Cultures et animaux
- Engrais organiques
- Déposition atmosphérique
- Fixation d'azote
- Lessivage et ruissellement
- Émission gazeuse
- Stockage ou épuisement des nutriments dans le sol

La quantification de chacun des termes du bilan peut se faire via des mesures directes ou indirectes. La première option est la plus fiable, mais elle est parfois difficile à mettre en œuvre. Par exemple, la quantité d'engrais organiques appliqués sur une parcelle ou dans une exploitation peut être facilement mesurée par le fermier. Les nutriments du fumier peuvent ensuite être quantifiés par une analyse directe en laboratoire (Billen et al., 2014 ; Bouwman, 1997 ; Bouwman et al., 2017; Hou et al., 2016 ; Lassaletta et al., 2019)¹⁰. Au contraire, les émissions de N₂ (par le processus de dénitrification) sont très difficilement mesurables directement, notamment à cause de la grande concentration en N₂ déjà présente dans l'atmosphère (Davidson & Seitzinger, 2006)¹⁰. La quantification indirecte des termes du bilan peut se faire de multiples façons. Des statistiques agricoles sont souvent disponibles à l'échelle régionale ou nationale et permettent une estimation de la fertilisation chimique (ex. Heffer, 2013 ; Heffer et al., 2017 grâce aux données de l'IFA ; Zhang et al., 2015 grâce aux données de la FAO ; Compere Leroy & Cornu, 2021; Dembélé et al., 2000; Wairegi & van Asten, 2013 via d'autres sources y compris des données déclaratives d'enquêtes), des rendements des cultures (Billen et al., 2014; Lun et al., 2018)¹⁰, ou d'autres termes. Les conversions entre masses fraîches (de grains, fumier ou résidus) et masses de nutriments (kg de nutriment par kg de produit) sont souvent réalisées sur base de données de la littérature (AUSNUT, 2013; Bouwman et al., 2017; FAO, 2006; Feedipedia, 2012; Gourley et al., 2010; IPNI, 2014; USDA, 2013)¹⁰. Pour les processus biologiques ou chimiques, des modèles sont souvent utilisés. Le flux de nutriments sortant par ruissellement peut ainsi être estimé à l'aide de données climatiques (Deelstra et al., 1998)¹⁰. Enfin, des travaux ont été réalisés pour évaluer le statut nutritif des plantes à l'aide de la télédétection (ACCP, 1994; Ollinger et al., 2002 et 2008;

¹⁰ Cité dans Zhang et al., 2020

Martin et al., 2008; Asner et Martin, 2008 cités dans Ustin, 2013; IFA, 2016; Yousfi et al., 2019). Cette approche pourrait aussi être utile pour estimer certains termes du bilan.

Indépendamment de la définition du système, les BN peuvent être difficiles à équilibrer à cause de l'incertitude liée à chacun des termes. Chaque méthode de quantification comporte des avantages et inconvénients. Le lecteur intéressé peut se référer à l'article de Zhang et al. (2020) pour en apprendre plus sur les difficultés liées à chaque terme.

4.3.3 Diversité des modèles pour la réalisation des bilans

Comme le montre la section précédente, la quantification des termes du bilan demande de l'expertise et du temps, or les décideurs (politique, agriculteur, etc.) n'en bénéficient pas toujours. De nombreux modèles et outils ont donc été développés pour rendre la gestion des nutriments plus facile. Chaque modèle est adapté à un contexte particulier et comprend des limitations dues aux différentes hypothèses qui permettent son développement (Cichota & Snow, 2009; Schlecht & Hiernaux, 2004). À titre d'exemple, Cichota & Snow (2009) dénombrent 16 modèles différents utilisables pour la quantification des pertes de nutriments dans les systèmes pastoraux en Nouvelle-Zélande. Quelques modèles ont aussi été développés pour le contexte de l'agriculture de petite taille en ASS. Parmi ceux-ci, Schlecht & Hiernaux (2004) distinguent trois catégories. (1) Les modèles statiques comme « *The Nutrient Monitoring* » (Nutmon) et son successeur « MonQi » (Duivenbooden & Beek, 2015) qui permettent une gestion facile des données à l'échelle de la ferme pour une échelle de temps donnée. (2) Les modèles des règles de décision (angl. *Decision rules model*) permettent de prendre en compte des changements de pratiques des producteurs sur le long terme, mais nécessitent beaucoup de données pour la calibration. (3) Certaines approches utilisent des SIG pour la gestion des données du bilan à différentes échelles spatiales (IFA, 2016; Schlecht & Hiernaux, 2004; Djaby, 2010).

5 Conclusion

Face aux défis actuels, l'agroécologie est une solution prometteuse. Malgré cela, elle est encore peu appliquée à grande échelle. Les études sur l'agroécologie se concentrent principalement sur les rendements, les avantages mesurables pour les sols, la biodiversité, ou la nutrition. Peu d'études se concentrent sur la disponibilité en MO, pourtant essentielle pour la faisabilité de l'agroécologie.

La nature du système de production majoritaire en ASS semble plus adaptée que d'autres à l'application de l'agroécologie. Ses caractéristiques (agriculture de petite taille, secteur informel, peu de données précises, etc.) suggèrent cependant que la télédétection est essentielle afin de caractériser le terroir de manière précise.

La cartographie de l'occupation du sol par télédétection a fait l'objet de nombreuses études et programmes. Les bilans de nutriments semblent être le meilleur outil pour évaluer la fertilité et la durabilité des systèmes, et ont aussi été utilisés dans de nombreuses études et contextes. Peu d'études combinent cependant la télédétection et les bilans de nutriments afin d'évaluer différents scénarios de gestion de la fertilité, surtout dans un contexte d'agroécologie en ASS. C'est donc dans ce cadre que cette étude s'inscrit.

II Zone d'étude : département de l'Atacora, Bénin

La zone d'étude comprend six villages du Département de l'Atacora (Bénin), tous étudiés dans le cadre de la thèse de Victorine Djago. Ils ont été choisis suite à un atelier départemental participatif, regroupant les acteurs du monde agricole (agriculteurs, organisations paysannes, techniciens agricoles, partenaires de développement dont Louvain Coopération et Eclasio, chercheurs). Les limites des villages ont été déterminées en reliant les quatre points limites de chaque village. Ces points ont été déterminés suite à des discussions avec les acteurs locaux (chef de village, chef des producteurs, etc.). Il n'a pas été possible de déterminer des limites plus précises à cause des conflits intervillages. Les quatre premiers points de ce chapitre aborderont la localisation, la topographie, le climat, et le contexte socio-économique et agraire de la région. Le dernier point justifiera le choix du village de référence.

1 Localisation

La zone d'étude est située en Afrique de l'Ouest, au Nord-Ouest du Bénin, dans le département de l'Atacora. Les six villages sont répartis dans trois communes : Tanguieta (Pessagou et Sammongou), Natitingou (Kotopounga et Moussasanmou) et Pehunco (Tonri et Gonri). Ils se situent à une distance de maximum 111 km les uns des autres (Figure 8).

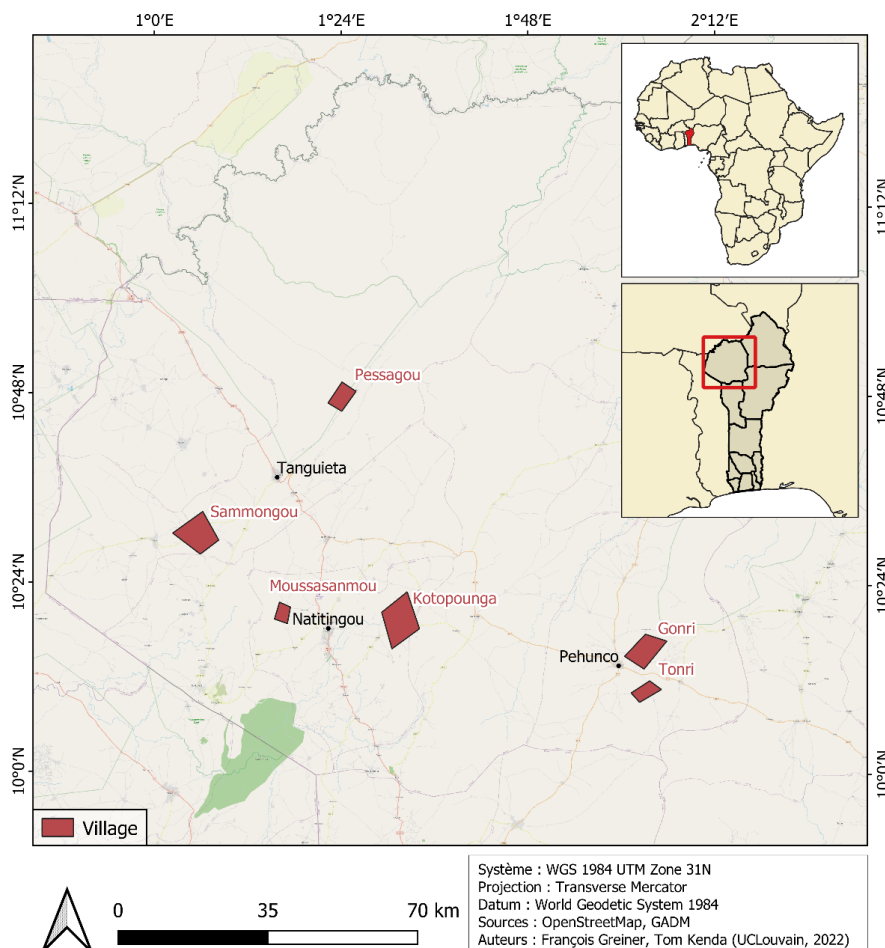
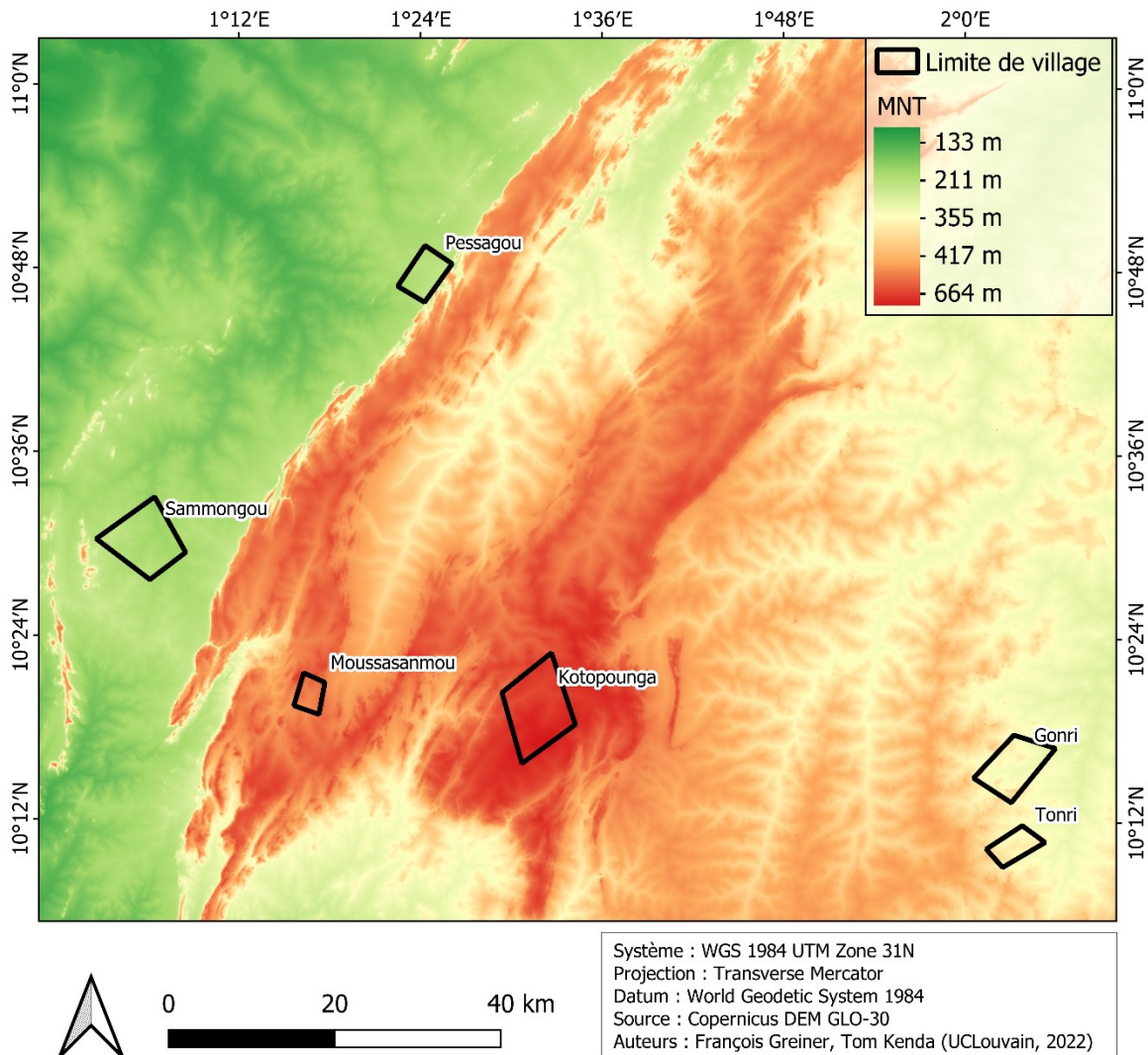


Figure 8 – Localisation des six villages de la zone d'étude par rapport à l'Afrique, le Bénin, et l'Atacora.

2 Topographie

L'Atacora est la région la plus montagneuse du pays, avec des altitudes variantes entre 100 et 820 m. Les villages de Pessagou et Sammongou sont situés aux altitudes les plus basses (<200 m), Kotopounga et Moussasanmou sont sur des plateaux (>450 m), et Gonri et Tonri se situent entre les deux (300-400 m) (Figure 9). Ces différences d'altitudes impactent le type d'agriculture pratiqué.



3 Climat

L'Atacora possède un climat de savane avec hiver sec (Aw), selon la classification de Köppen-Geiger (Ouranos et al., 2020). La région est située dans la zone bioclimatique soudanienne (Ballouche, 2019).

La moyenne de température annuelle de la région est de 28°C, avec des moyennes minimales et maximales de 22 et 34°C respectivement. Les précipitations annuelles représentent en moyenne 1050 mm, avec des pluies presque exclusivement réparties entre les mois d'avril et octobre (Figure 10).

Pour l'année 2021, le mois de mai a été sec par rapport à la moyenne 1991-2020. Le rapport du WFP (Word Food Program) sur la saison des pluies de 2021 confirme cette anomalie. Pour l'Atacora, le mois de juin est caractérisé par des valeurs de NDVI jusqu'à 70 % plus faibles par rapport à la normale (Figure 47 en annexe), et la période de semis a connu un retard de 10 à 20 jours. Les agriculteurs mentionnaient fréquemment ce problème lors de notre campagne de terrain. Cependant, la suite de la saison est caractérisée par des pluies bien au-dessus de la normale. En septembre et octobre, le NDVI est à nouveau situé dans la moyenne, ce qui montre que la végétation a rattrapé son retard (WFP, 2021b).

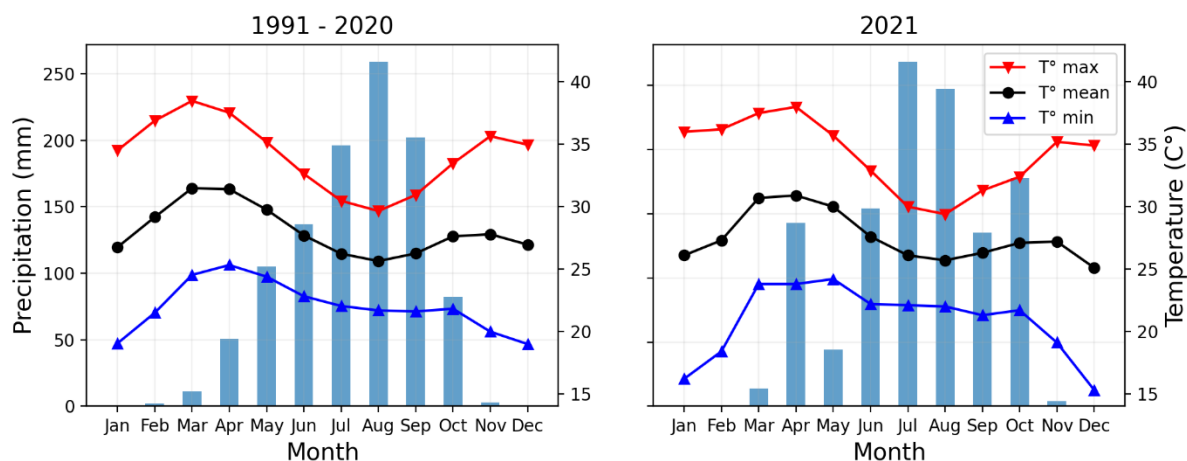


Figure 10 – Précipitations et températures maximales, moyennes et minimales mensuelles pour le département de l'Atacora sur la période 1991-2020 (gauche, source de données : CRU TS v.4.05) et pour l'année 2021 (droite, source de données : Infoclimat, 2021, graphique par Greiner et Kenda, 2022).

4 Contexte socio-économique et agriculture

Le Bénin est un des pays en développement avec le taux de croissance le plus élevé (+7 % en 2019). Cependant, le taux de pauvreté n'a pas significativement diminué et s'établit à 39 %. D'importantes inégalités existent aussi en termes d'accès à l'éducation entre garçons et filles, à l'eau, à l'électricité, etc. L'Atacora est la région la plus touchée par l'insécurité alimentaire modérée et sévère (24 %). La situation politique est considérée comme stable, et le régime est démocratique. Du point de vue sécuritaire, les incursions de groupes djihadistes depuis le Burkina Faso sont de plus en plus fréquentes, avec notamment des attaques fin 2021 dans l'Atacora (INSAE, 2018; PNUD, 2022).

L'agriculture est toujours le secteur clé du Bénin. Elle fournit 40 à 70 %¹¹ des emplois, représente 36 % du PIB et contribue à 75 à 90 % des exportations (coton et noix de cajou principalement) (MENC & MAEP, 2019; PNUD, 2022).

Les systèmes agraires de la région de l'Atacora sont caractérisés par deux types de cultures : les cultures vivrières et les cultures de rente. Les principales cultures vivrières sont

¹¹ Les chiffres varient en fonction des rapports.

les céréales (maïs¹², sorgho, etc.) et les tubercules (manioc, igname, etc.), suivis par les légumineuses (soja, niébé, etc.) et les oléagineux (arachides, noix de palme, etc.). Le coton et l'anacardier sont les principales cultures de rente. Les zones de maraichage, dont les récoltes sont vendues aux marchés locaux, sont présentes principalement dans les bas-fonds. L'agriculture est familiale, pratiquée avec des outils manuels (la « daba ») et sur de petites surfaces (4,8 ha par exploitation en moyenne) (Alastaire & Yagbedo, 2018; DSA-Bénin, 2021; INSAE, 2016, 2018; Tapsoba et al., 2020).

L'utilisation d'intrants concerne 30 % des ménages agricoles béninois. L'Atacora est une des régions qui en consomme le plus, avec 80 % des ménages agricoles qui utilisent des engrais chimiques et seulement 12 % des engrais organiques (INSAE, 2018). Les engrais chimiques utilisés sont en grande partie ceux prévus pour le coton (NPK 14-23-14), car ils sont subventionnés par l'Etat et plus facilement accessibles. Toujours dans l'Atacora, l'apport d'intrants ne compense en général pas la perte d'éléments nutritifs causée par les cultures, et les sols ne sont donc pas exploités durablement (Alastaire & Yagbedo, 2018; Djenontin et al., 2003; INSAE, 2018).

L'élevage est concentré au nord du pays. Dans l'Atacora, 56 à 78 %¹³ des ménages pratiquent la production animale. La possession d'animaux joue un rôle important dans la stratégie de survie, car elle est considérée comme source de diversification des activités et d'épargne. Les animaux sont utilisés pour rembourser des dettes, revendus en période de soudure pour générer des revenus, etc., mais rarement utilisés pour l'autoconsommation (DSA-Bénin, 2021; INSAE, 2018).

L'élevage de bovins a considérablement augmenté ces dernières décennies et représente 81 % de la valeur de la filière animale. Deux types d'élevages bovins existent : l'élevage semi-sédentaire (agropastoralisme) et mobile (pastoralisme). Les éleveurs semi-sédentaires sont des autochtones installés sur des territoires dont ils sont propriétaires. Ils pratiquent une transhumance saisonnière de deux à trois mois, et associent l'élevage aux cultures. Les éleveurs mobiles sont des migrants de plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest, essentiellement du peuple Peuhl. Ils ont des cheptels plus importants, et ont des campements qu'ils déplacent après 2 à 10 ans, quand les terres aux alentours sont trop défrichées. Avec la diminution de l'offre fourragère des pâturages naturels - causée entre autres par l'extension des terres cultivées, l'engouement pour le coton, l'interdiction d'accès à certaines pâtures et le changement climatique - les conflits éleveurs-agriculteurs sont de plus en plus fréquents (Djenontin et al., 2009; SOS Faim, 2015; Sounon, Ickowicz et al., 2019; Sounon, Lesse, et al., 2019). Ces conflits ont souvent été mentionnés lors de notre campagne de terrain.

¹² Au niveau des surfaces, le maïs est la culture la plus importante de la région (100.000 ha). Elle est suivie par le coton (94.000 ha) (INSAE, 2016).

¹³ Les chiffres varient en fonction des sources.

5 Village de référence

Le choix d'un village de référence s'est avéré nécessaire afin de concentrer nos efforts d'analyse sur un village. Le village de Gonri a été choisi, car il couvre assez bien la diversité des exploitations agricoles rencontrées dans les autres villages de la région de l'Atacora. Ce village possède en effet une superficie de 40 km², proche de la moyenne des six villages (35 km²). Grâce à son altitude intermédiaire (300-400 m), le village possède une grande diversité de cultures (cultures de type « plateau » comme le maïs et cultures de bas-fond comme le riz et le maraichage). Au cours de la visite du village, nous avons aussi remarqué que les cultures associées n'étaient que peu pratiquées, ce qui rend le village moins représentatif mais facilitera les calculs. La campagne de terrain a aussi permis de collecter beaucoup de points GPS dans ce village. Finalement, l'image satellite du village de Gonri est de qualité satisfaisante.

III Matériels et méthodes

La méthodologie suivie durant ce mémoire, décrite à la Figure 11, peut être divisée en trois étapes principales. Tout d'abord, les images satellites et les données acquises sur le terrain sont utilisées pour caractériser le terroir par télédétection (III.2). Une carte d'occupation de sol est notamment produite. Ensuite, des enquêtes auprès des agriculteurs (III.3) et des échantillonnages de biomasse (III.4) sont réalisés. Cela permet de quantifier les ressources organiques relatives à chaque occupation de sol du terroir. Finalement, différents scénarios d'utilisation des ressources sont imaginés et des bilans de nutriments sont réalisés afin d'évaluer la durabilité du système (III.5). Avant de rentrer dans le vif du sujet, la section III.1 donne quelques informations à propos des logiciels utilisés et de la campagne de terrain.

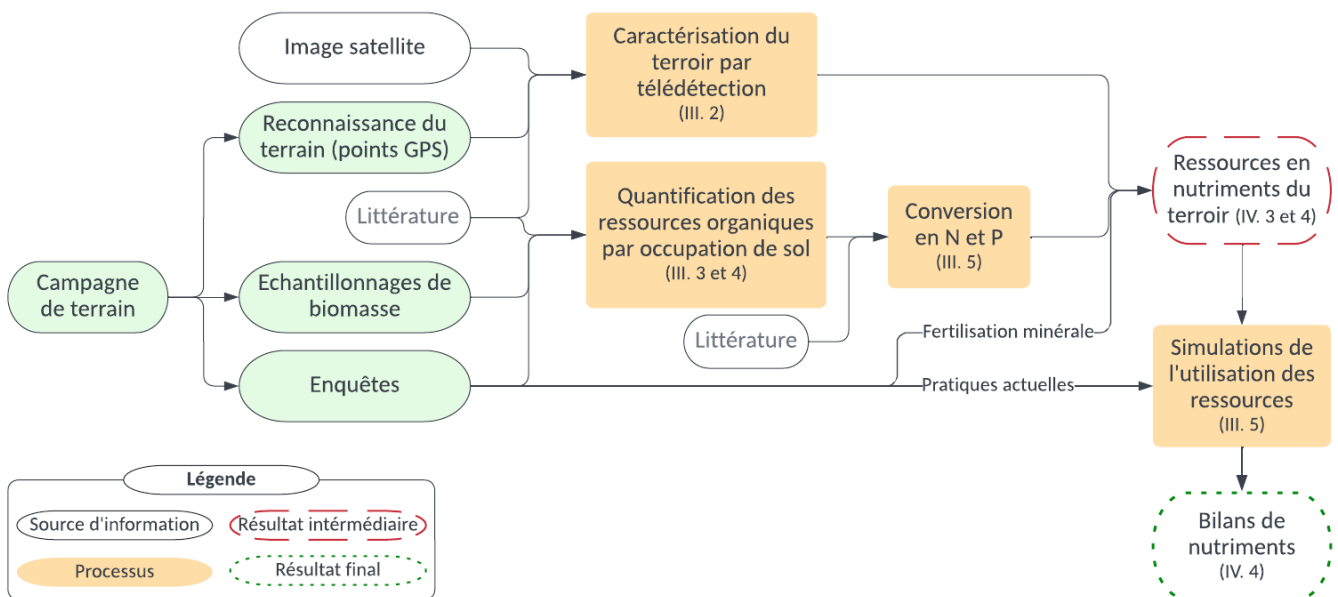


Figure 11 – Schéma de la méthodologie générale du mémoire.

1 Généralités/Matériels

1.1 Logiciels

Le Tableau 1 présente la liste des logiciels utilisés et leur utilisation dans le cadre de ce mémoire.

Tableau 1 – Liste des logiciels utilisés.

Logiciel	Version	Description
ArcMap	10.8	ArcMap est le principal logiciel de la suite ArcGIS de la société Esri. Il est principalement utilisé pour afficher, modifier, créer et analyser des données géospatiales. https://desktop.arcgis.com/fr/desktop/
Basecamp	4.7.4	Garmin BaseCamp est un logiciel de visualisation de cartes ou SIG principalement destiné à être utilisé avec les appareils de navigation GPS Garmin. Il permet notamment de transférer les données GPS vers un ordinateur. https://www.garmin.com/fr-BE/software/basecamp/
KoBoToolbox	-	KoBoToolbox est une suite d'outils pour la collection et l'analyse de données de terrain dans des environnements compliqués, comme des urgences humanitaires. Le logiciel est gratuit, open source, robuste et facile à utiliser. Il est utilisé en parallèle avec l'application KoBoCollect, qui permet d'encoder les données depuis un smartphone ou une tablette, en étant en ligne ou hors-ligne. https://www.kobotoolbox.org/
Orfeo Toolbox	8.0.0	Orfeo Toolbox (OTB), est une librairie de traitement d'images dédiée à la télédétection. C'est un logiciel open source financé et développé par le CNES. Il permet de traiter de grands volumes de données de façon optimisée et possède de nombreuses fonctions : extraction de bandes, indices radiométriques, classification supervisée ou non, algorithme Random Forest, calcul de matrice de confusion, etc. https://www.orfeo-toolbox.org/
Spyder (Librairie Pandas)	5.1.5 (1.4.2)	Spyder est un environnement scientifique gratuit et open source écrit en Python et fait pour Python (ici la version 3.8). Il est notamment fourni par la distribution Anaconda. La librairie la plus utilisée est Pandas (1.4.2), un outil d'analyse et de manipulation de données open source rapide, puissant, flexible et facile à utiliser, construit à partir du langage Python. https://pandas.pydata.org/

QGIS	3.16.3	<p>QGIS est un logiciel SIG open source. Il possède globalement les mêmes fonctions qu'ArcMap, à savoir afficher, modifier, créer et analyser des données géospatiales. De nombreux plugins et extensions peuvent être ajoutés. Dans le cadre de ce mémoire, QGIS a été utilisé avec l'extension GRASS 7.8.5, le <i>Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)</i> 7.10.6 et le <i>Map Swipe Tool</i>.</p> <p>https://www.qgis.org/</p>
RStudio	2022.02.3 492	<p>Environnement de développement intégré (IDE) pour R (ici la version 4.0.3). RStudio est disponible en versions open source et commerciale et peut fonctionner sur le bureau ou via un serveur. Il nous a été utile en particulier pour l'analyse statistique des données d'enquête.</p> <p>https://www.rstudio.com/products/rstudio/</p>

1.2 Campagne de terrain

La campagne de terrain a eu lieu du 6 juillet au 23 août pour François, et du 2 août au 13 septembre pour Tom, soit durant la période de culture et juste avant le maximum de végétation (fin septembre). Elle a eu lieu avec l'accompagnement permanent de Victorine Djago, doctorante. Quatre des six villages de l'étude ont été visités lors de 27 journées de terrain. Les deux derniers villages ont été visités par Victorine seulement, étant donné qu'ils étaient situés en zones classées vigilance orange et rouge par le ministère des Affaires étrangères.

Les villages étaient systématiquement visités avec des guides, qui étaient les chefs de village ou des producteurs parlant couramment le français. Nous étions également accompagnés d'étudiants ou de stagiaires de l'ONG Eclasio, qui nous aidaient par exemple à encoder les données ou reconnaître les essences d'arbres.

Sur le terrain, nous avons accompli trois tâches :

- Enquêter 30 agriculteurs par village
- Collecter des points GPS de toutes les occupations du sol, accompagnés de leurs caractéristiques.
- Récolter et peser des échantillons de biomasse de plusieurs types de végétation (cultures pluviales et maraichères, savanes, etc.)

Toutes ces données ont été collectées à l'aide du logiciel KoBoToolbox. Avec ce logiciel, des formulaires en ligne ont été créés au préalable. Lors des visites de terrain, les formulaires étaient complétés avec l'application KoBoCollect sur des smartphones ou tablettes. Cette méthode a permis d'encoder rapidement et de manière structurée les données. Il était aussi possible d'ajouter des photos directement dans les formulaires, ce qui a l'avantage de lier les photos aux données. Un dernier avantage est que l'application ne requiert pas de connexion

internet pour fonctionner. Le détail de la méthodologie appliquée sur le terrain et du traitement des données se trouve au chapitre II.2 (Télédétection), III .3 (Enquêtes) et III.4 (Échantillonnages).

2 Cartographie de l'occupation du sol

L'objectif principal de ce chapitre est de produire une carte d'occupation des sols du village de référence (Gonri). Celle-ci permettra de déterminer les surfaces occupées par chaque classe d'occupation de sol, afin de déterminer les sources et besoins en matières organiques. L'ensemble des étapes de la méthodologie sont représentées dans le *workflow* à la Figure 15.

2.1 Images Pléiades

Le choix des images satellites doit être réfléchi en fonction des besoins. Dans cette étude, des images à très haute résolution (<1m) sont nécessaires pour faire face à la grande hétérogénéité au sein des villages (petits champs, présence généralisée d'arbres isolés dans les champs, etc.). Une résolution temporelle élevée est aussi nécessaire pour maximiser nos chances d'obtenir des images avec une faible couverture nuageuse, étant donné qu'il est difficile d'obtenir des images sans nuages dans ces régions à cette période (saison des pluies). Finalement, avoir au moins une bande dans le spectre infrarouge (IR) s'avère indispensable pour l'analyse de la végétation.

Le couple de satellites Pléiades (1A et 1B) répond le mieux à nos besoins et a donc été choisi pour cette étude. Ils ont été développés par le CNES (Agence spatiale française), sont opérés par Airbus Defence and Space Intelligence, et ont été lancés en 2011 et 2012. Ils fournissent une bande panchromatique (PAN) à 50 cm (70 cm, rééchantillonnée à 50 cm) et une image multispectrale (MS) à 4 bandes (visible et proche IR) à 2 m (2.8 m, rééchantillonnée à 2 m) (Tableau 2). La fusion des bandes PAN et MS permet d'obtenir une image à 4 bandes avec une résolution de 50 cm (cf. 2.4.1.1). Ils possèdent une capacité de revisite journalière, grâce à leur positionnement sur la même orbite, à 180° l'un de l'autre. Les bandes sont acquises en 12 bits, ce qui signifie que chaque pixel peut prendre des valeurs entre 0 et 4096 (2^{12}). Cela permet de discriminer des nuances subtiles. Dans le cadre de cette étude, les images sont commandées au niveau de traitement géométrique « orthorectifié » (les distorsions induites par la parallaxe due au relief et à l'angle ont donc été corrigées) et au niveau de

Tableau 2 – Bandes spectrales des satellites Pléiades 1A et 1B (Airbus Defence and Space Intelligence, 2012)

Bandes spectrales des satellites Pléiades (1A et 1B)		Bande spectrale	Résolution spatiale
Bande 1	Bleu	430-550 nm	2 m
Bande 2	Vert	500-620 nm	2 m
Bande 3	Rouge	590-710 nm	2 m
Bande 4	Proche infrarouge (PIR)	740-940 nm	2 m
Bande P	Panchromatique (PAN)	470-830 nm	0.5 m

traitement radiométrique « réflectance » (les images ont donc été corrigées selon l'étalonnage du capteur et des effets systématiques de l'atmosphère), afin qu'elles soient directement utilisables (Airbus Defence and Space Intelligence, 2012).

Pour le lecteur intéressé, les images commandées dans le cadre de ce mémoire sont accessibles librement pour tout citoyen belge, via la plateforme pleiades4belgium.be.

2.2 Collecte des données de terrain

Classifier l'occupation du sol des villages demande de réaliser une campagne de terrain, afin d'acquérir des connaissances pour pouvoir ensuite identifier tous les éléments sur les images acquises. Cette connaissance permettra d'entraîner l'algorithme de classification et ensuite de valider la classification.

Des points GPS ont été collectés à cet effet dans chaque village, avec les GPS Garmin GPSMAP 62stc et 64s. Quand cela était possible, les points étaient pris à au moins 10 m du bord de la classe de végétation concernée, afin d'éviter toute confusion lors de l'interprétation. Les points ont été collectés de manière opportuniste, le plus souvent le long des chemins, afin de pouvoir collecter plus de données et en raison de la difficulté d'accès de certains lieux (Figure 12). Toutefois, une attention particulière a été accordée à la couverture de la diversité des cultures et des types de sol. Une visualisation préalable d'images Google Earth et Sentinel-2 a aussi permis de repérer des objets non reconnus, à identifier sur le terrain. Pour chaque point, les informations suivantes étaient notées dans le formulaire KoBoToolbox (exemple du formulaire à l'annexe 3.2) :

- Le numéro du point GPS
- La superficie approximative de l'endroit concerné
- Le type de sol (selon la classification locale)
- Le type d'occupation du sol (culture, forêt, savane, sol nu, maison, rivière, route, etc.)
- Dans le cas d'une culture, la ou les spéculations, avec leurs proportions respectives
- Dans le cas d'une forêt, le type (ripicole, plantée, etc.) et la densité d'arbres
- Dans le cas d'une savane, la densité d'arbres et l'utilisation (pâturée, en jachère, ou non utilisée)
- Éventuellement une photo du lieu et un commentaire

Les points GPS ont ensuite été exportés dans une table à l'aide du logiciel Basecamp de Garmin. Afin d'obtenir une table d'attributs pour l'analyse d'image ultérieure, la table des points GPS et celle de KoBoToolbox contenant les caractéristiques de chaque point ont été fusionnées et homogénéisées avec l'aide de la librairie Pandas en Python (The pandas development team, 2022).

Le Tableau 3 présente le nombre de points GPS récoltés par village et par type de sol. Au total, 1010 points de reconnaissance ont été récoltés. Le Tableau 4 présente lui le nombre de points GPS récoltés par type d'occupation de sol et par village. Finalement, la Figure 13 présente la localisation spatiale des points récoltés dans le village de référence (Gonri).



Figure 12 – Collecte des points GPS. 1) Prise d'un point GPS, 2) Tournée de terrain en suivant un guide qui connaît la localisation des types de sols et des cultures, et les dangers, 3) Apprentissage de l'encodage des données à un stagiaire, 4) Le GPS Garmin GPSMAP 62stc, 5) La saison des pluies rendant les déplacements impossibles, 6) La présence de serpents (vipère ici) rendant les déplacements en dehors des chemins périlleux.

Tableau 3 – Nombre total de points GPS récoltés par village et par type de sol. Le nombre total de points ne correspond pas au nombre total de points par type de sol car, pour certains points, le type de sol n'a pas pu être identifié.

Village	Nombre total de points	Type de sol					
		Bas-fond	Caillouteux -rouge	Gravillonnaire	Sableux	Sablo-argileux	Argileux
Gonri	251	116	92	0	0	0	9
Kotopounga	280	28	67	13	6	152	0
Moussasanmou	114	0	58	11	0	32	1
Pessagou	106	102	1	0	0	0	0
Sammongou	103	2	101	0	0	0	0
Tonri	156	25	71	0	0	56	0
Total	1010	273	390	24	6	240	10

Tableau 4 – Nombre de points GPS récoltés par catégorie d'occupation de sol et par village. Les points correspondant à un mélange de culture pluviale avec du maraichage ou un verger ont ici été considérés comme des cultures pluviales.

Village	Type d'occupation du sol						
	Culture pluviale	Culture maraichère	Jachère	Savane	Forêt	Verger	Autre
Gonri	163	23	23	4	2	0	58
Kotopounga	186	9	8	18	1	20	15
Moussasanmou	81	16	0	5	0	4	10
Pessagou	100	0	6	5	0	0	14
Sammongou	81	3	11	1	0	1	0
Tonri	112	2	12	9	1	6	0
Total	723	53	60	42	4	31	97

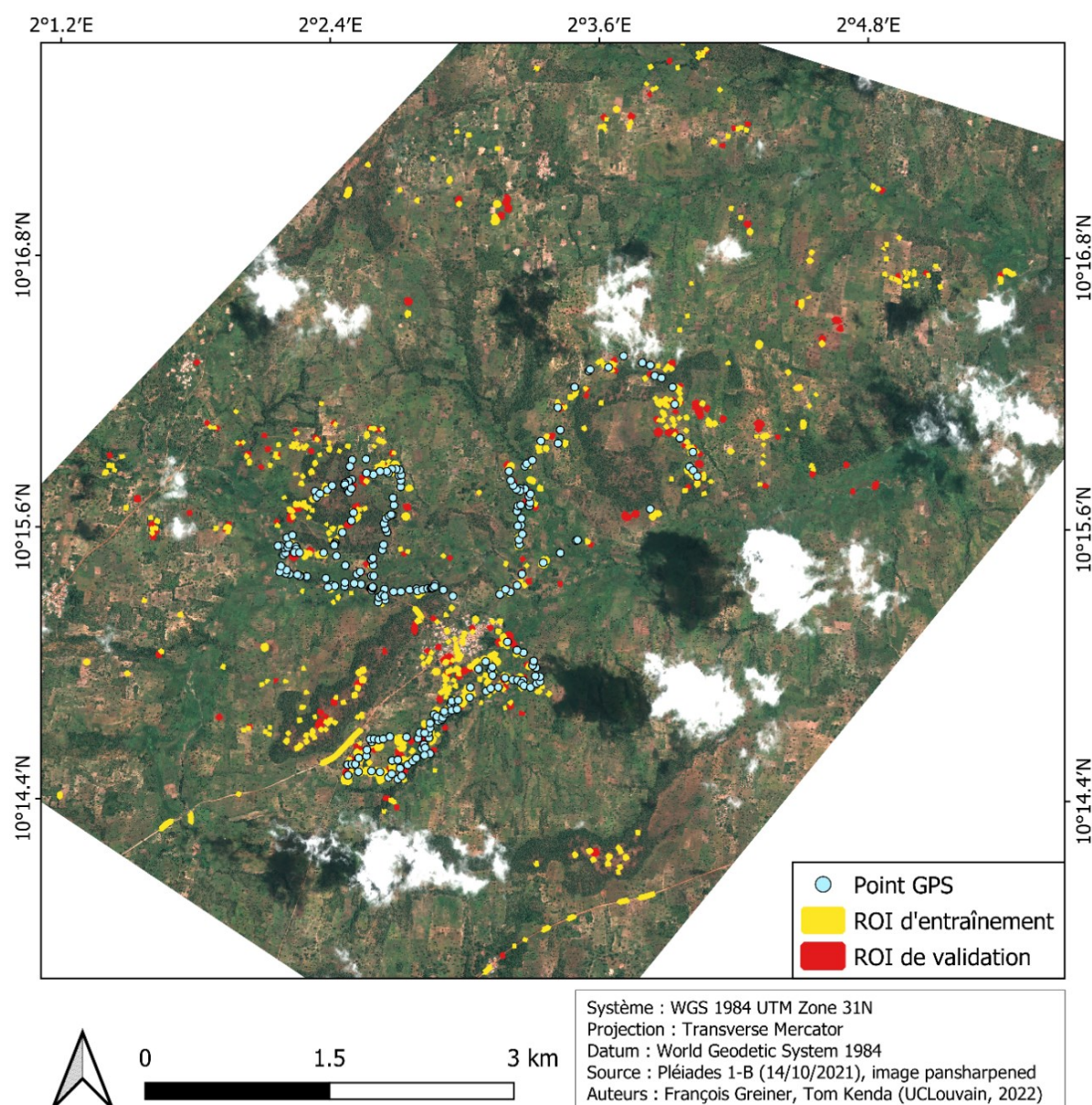


Figure 13 – Image du village de Gonri, montrant les points GPS et les ROI. Pour faciliter la visualisation, l'entière du village n'est pas visible. Les ROI d'entraînement sont les polygones créés pour entraîner l'algorithme de classification. Les ROI de validation sont les polygones créés pour valider la classification et créer une matrice de confusion. Elles sont souvent situées près des zones visitées (points GPS).

2.3 Masque des nuages

L'acquisition des images Pléiades du village de Gonri a eu lieu le 14 octobre 2021. Elle était initialement prévue pour le mois de septembre, mais la présence trop importante de nuages a retardé l'acquisition. Cependant, quelques nuages et ombres de nuages restent présents sur l'image du 14 octobre. Il est nécessaire de les masquer avant de procéder à la classification de l'occupation du sol.

Le masque fourni par Airbus n'étant pas satisfaisant, nous en avons donc développé un nous-mêmes. Il a été décidé de suivre globalement la même méthodologie qui sera utilisée pour la classification de l'occupation du sol (III.2.4-2.5). Pour cette raison, la méthodologie ne sera ici que brièvement résumée (Figure 14).

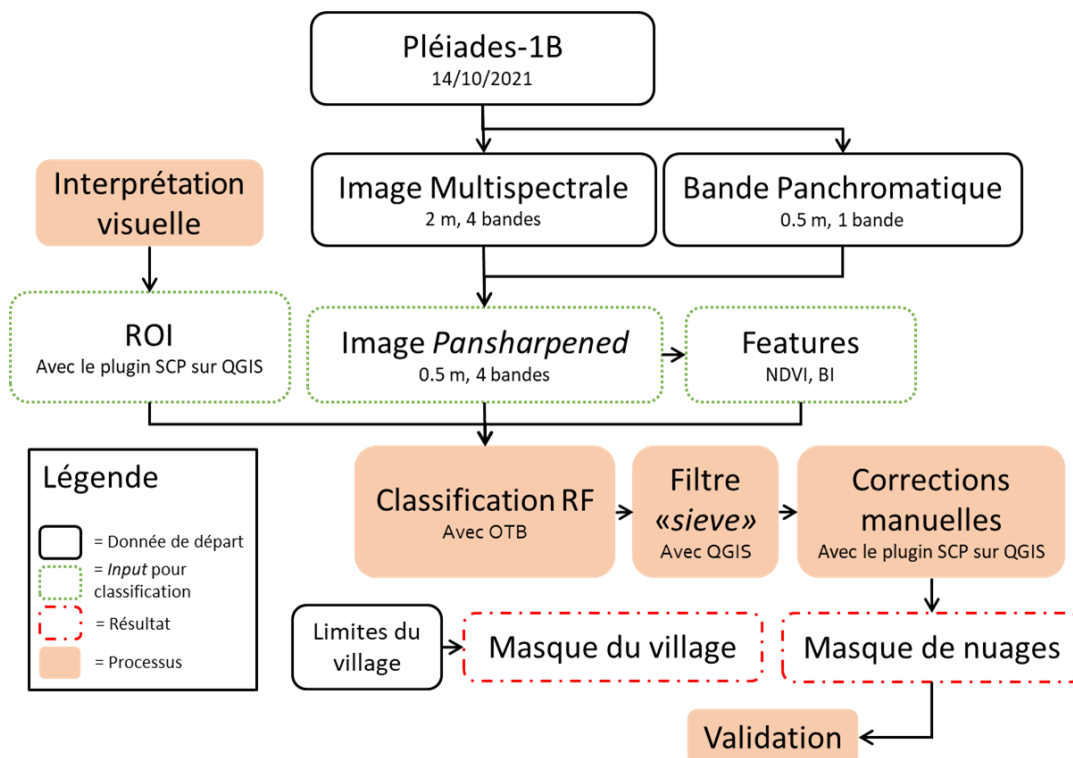


Figure 14 – Workflow pour la création du masque de nuages.

Pour enlever l'effet poivre et sel, dû à la confusion entre des nuages et certains sols nus, ou des ombres de nuages et des ombres d'arbres, un filtre de type 'sieve' a été appliqué. Ce filtre supprime les groupes de pixels plus petits qu'un seuil donné et les remplace par la valeur du plus grand groupe de pixels voisin. Un seuil de 8000 pixels (soit 0.2 ha) a ici été choisi, car l'analyse visuelle a permis de déterminer que les nuages ou leurs ombres font toujours au moins cette surface. Par la suite, une correction manuelle a tout de même encore dû être effectuée avec l'outil « *edit raster* » du plugin SCP.

Le masque a finalement été validé avec une matrice de confusion, et les résultats avant et après l'application du filtre ont été comparés (cf. III.2.6). Les différents masques ont été comparés afin d'identifier la méthode la plus appropriée, qui pourra aussi être appliquée pour

les autres villages. Un deuxième masque, qui comprend les parties de l'image en dehors des limites du village, a été créé. Il permettra de calculer des statistiques uniquement à l'intérieur des limites du village¹⁴.

2.4 Préparation des données

Les données d'entrée (angl. *inputs*) pour l'algorithme de classification peuvent être divisées en deux catégories. Tout d'abord, les *features* sont toutes les bandes dérivées des images Pléiades qui serviront à créer le jeu de données raster (III.2.4.1). Ensuite, les données de terrain qui ont permis de créer les aires d'entraînement, qui formeront le jeu de données vectorielles (III.2.4.2).

2.4.1 Features

2.4.1.1 Pansharpening

Le processus de fusion d'images ou *pansharpening* consiste en la fusion d'une image PAN (grande résolution spatiale, qui permet de mieux distinguer les objets et les textures) avec une image MS (grande résolution spectrale, qui permet de discriminer les classes d'occupation du sol) pour finalement obtenir une image MS qui combine les meilleures caractéristiques des deux images. Les méthodes de fusion peuvent être divisées en quatre classes : substitution de composantes (CS), analyse multirésolution (MRA), hybrides (une combinaison de CS et MRA), et algorithmes basés sur des modèles. La méthode IHS (Intensity-Hue-Saturation) est la méthode la plus commune. Elle fonctionne par substitution ; l'algorithme va donc séparer les détails spatiaux et spectraux pour substituer les détails spatiaux par la bande PAN. Cette technique nécessite un temps de calcul faible et permet de d'améliorer la résolution spatiale de manière satisfaisante, mais plusieurs études révèlent qu'elle provoque une distorsion de couleurs (vers des couleurs plus vives) et réduit donc la résolution radiométrique, ce qui complique la classification des classes d'occupation du sol (Dadrass Javan et al., 2021; Fasbender et al., 2008; Ghassemian, 2016).

En réponse à ce problème, la méthode de fusion Bayésienne (BDF), qui se base sur les relations statistiques entre les bandes MS et PAN, a été proposée par Fasbender et al. (2008). C'est une méthode adaptative, robuste et facile à implémenter, qui permet de pondérer le poids des bandes MS et PAN en fonction des besoins et du lieu d'étude. Comparée à quatre autres méthodes principales (dont IHS), elle s'est montrée la plus performante pour la résolution radiométrique (sauf dans le cas d'une forêt dense). La méthode a aussi permis d'obtenir de très bons résultats dans une étude cartographiant la végétation d'îles algériennes (Hamimeche et al., 2021). Dans le cadre de cette étude, la pondération entre les bandes MS et PAN (ω) est de 0.55, afin de favoriser la résolution spectrale et par cohérence avec la pondération optimale calculée par Fasbender et al. (2008) dans le contexte qui se rapproche

¹⁴ Les limites des villages sont définies dans l'introduction du Chapitre II.

le plus de notre étude (contexte méditerranéen). La fusion est réalisée à l'aide de l'outil « BundleToPerfectSensor » sur OTB.

Les deux méthodes retenues (IHS et BDF) ont été comparées afin d'identifier la solution la plus appropriée, qui pourra aussi être appliquée pour les autres villages.

2.4.1.2 Indices spectraux

Pour permettre de mieux distinguer les subtiles différences entre les signatures spectrales des classes d'occupation du sol, de nouveaux *features* doivent être créés à partir de l'image fusionnée. Au total, huit indices spectraux ont été créés, afin d'avoir au moins un indice pour chaque paire de bandes (Figure 15). La plupart des indices se basent sur la différence normalisée, à l'image du NDVI, et sont donc appelés « *NDVI-like* ». Tous les indices utilisés ont été calculés avec l'outil « RadiometricIndices » d'OTB et sont détaillés au Tableau 5.

Tableau 5 – Description des indices de végétation. Les bandes 1, 2, 3 et 4 sont représentées par les lettres R (rouge), G (vert), B (bleu) et PIR (proche infrarouge).

Nom	Bandes	Formule	Source	Utilité
<i>Plant Pigment Ratio</i> (PPR)	B, G	$\frac{G - B}{G + B}$	(Metternicht, 2003)	Les pigments foliaires présentent des pics d'absorption dans la bande bleue.
<i>Normalized total Pigment to Chlorophyll a ratio Index</i> (NPCl)	B, R	$\frac{R - B}{R + B}$	(Peñuelas et al., 1993)	Bien corrélé avec la teneur en chlorophylle.
<i>Blue NDVI</i> (BNDVI)	B, PIR	$\frac{PIR - B}{PIR + B}$	(Wang et al., 2007)	-
<i>Redness Index</i> (RI)	G, R	$\frac{R - G}{R + G}$	(Escadafal & Huete, 1991)	Permet de limiter le bruit dû au sol dans des zones avec une faible couverture végétale.
<i>Brightness Index</i> (BI)	G, R	$\sqrt{\frac{G^2 + R^2}{2}}$	(Kumar et al., 2015)	Permet d'analyser les sols.
<i>Green NDVI</i> (GNDVI)	G, PIR	$\frac{PIR - G}{PIR + G}$	(Gitelson et al., 1996)	Cinq fois plus sensible au Chlorophylle a et plus grand gamme dynamique que le NDVI. Couramment utilisé pour définir l'absorption en eau et en azote.
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI)	R, PIR	$\frac{PIR - R}{PIR + R}$	(Rouse, 1974)	Indice de référence.

Second Modified Soil
Adjusted Vegetation
Index (MSAVI₂)

R, PIR

$$\frac{\left(\frac{2 * PIR + 1 - \sqrt{(2 * PIR + 1)^2 - 8 * (PIR - R)}}{2} \right)}{2} \quad (\text{Qi et al., 1994})$$

Minimise l'effet du sol nu, a une plus grande gamme dynamique et est donc plus sensible à la végétation, et le facteur L est auto-ajustable.

2.4.1.3 Indices de texture

Des indices de texture de type Haralick ont aussi été calculés, au vu des différences de textures importantes entre les classes d'occupation du sol. Avec l'outil « HaralickTextureExtraction » d'OTB, des rasters composés de huit bandes sont formés, chaque bande étant une autre variable de Haralick (Energie, Entropie, Corrélation, Moment de différence inverse, Inertie, Ombrage des clusters, Prominence des clusters et Corrélation de Haralick). Après analyse des résultats, c'est les *features* 1 et 8 (Énergie et Corrélation de Haralick), avec des fenêtres de 5x5 et 9x9 pixels et calculées depuis les bandes 1 et 4 (B et PIR) qui permettaient le mieux de différencier les classes. Cinq bandes ont donc été sélectionnées au total (Figure 15).

2.4.2 ROI

Avant de délimiter les régions d'intérêt (ROI, angl. *region of interest*), une légende à quatre niveaux a été créée. Le niveau 1 sépare uniquement les surfaces cultivées des surfaces non-cultivées. Le niveau 2 sépare les surfaces non-cultivées en 4 classes et contient donc 5 classes en tout. Le niveau 3 contient 10 classes : 4 classes pour les cultures et 6 classes pour les autres surfaces. Les classes « arbre » et « ombre » ont ici été regroupées car après analyse, il est apparu que presque toutes les ombres étaient liées à un arbre. Le niveau 4 sépare les cultures en 7 classes et les autres surfaces en 10 classes. Au vu de la très haute résolution spatiale (0.5 m) et de la méthode de classification par pixel et non par objet, il s'est avéré nécessaire de ne pas faire de catégorie « forêt » ou « savane », mais plutôt « arbre », « ombre », « végétation herbacée » et « arbuste ». A cause de la date de prise de vue (14 octobre), certaines cultures étaient déjà sénescentes ou récoltées, et les cultures ont donc été divisées entre les classes 'vertes' et 'sénescentes'. Finalement, les cultures qui représentaient moins de 1.25 % des surfaces cultivées selon les enquêtes (niébé, arachide, lentille, etc.), n'ont pas été incluses dans la classification, le nombre de points GPS étant de toute façon trop faible pour ces classes (Tableau 6).

Les ROI, qui correspondent donc à des polygones, sont créées à l'aide du plugin SCP sur QGIS (Congedo, 2021). Pour les cultures, c'est presque uniquement autour des points GPS que des ROI ont été créées, le risque d'erreur par photo-interprétation étant trop élevé. Pour les surfaces non-cultivées, les ROI ont principalement été créées par photo-interprétation, les points GPS pour ces classes étant peu nombreux et l'interprétation des images étant aisée. Toutes les ROI dessinées contenaient des groupes de pixels les plus homogènes possible, mais

Tableau 6 – La légende d’occupation des sols, divisée en quatre niveaux. Les deux dernières colonnes reprennent le nombre de ROI par classe et le % de surface qu’elles représentent. Végé = Végétation.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	N°	Nombre de ROI	% de la surface
Cultivé	Cultures	Soja	Soja ‘vert’	1	111	19,6
			Soja ‘sénescents’	2	19	4,0
		Maïs, Sorgho, Mil	Maïs, Sorgho, Mil ‘vert’	3	60	16,3
			Maïs, Sorgho, Mil ‘sénescents’	4	28	8,4
		Coton	Coton ‘vert’	5	20	1,7
			Coton ‘sénescents’	6	16	3,5
		Riz	Riz	7	24	3,9
Non-cultivé	Végétation naturelle	Végé herbacée et arbustes	Végé herbacée	8	91	11,0
			Arbuste	9	32	4,2
		Arbre	Arbre	10	173	5,3
			Ombre	11	67	0,5
	Sol nu	Sol nu agricole	Sol nu agricole	12	55	6,5
			Sol nu de type ‘cui rasse’	13	40	5,6
			Sol nu (autre)	14	23	7,3
	Eau	Eau	Eau	15	22	1,1
	Surface bâtie	Surface bâtie	Surface bâtie 1	16	19	0,8
			Surface bâtie 2	17	8	0,4

cela n’était cependant pas facile au vu de la résolution spatiale. Au total, 808 ROI (soit 9.8 hectares, dont 58 % de cultures) ont été créées. Afin d’éviter de surentraîner certaines classes et d’en sous-entraîner d’autres, les aires d’entraînement ont été créées de sorte à respecter le mieux possible la proportion réelle des classes (Millard & Richardson, 2015). Cette proportion réelle est estimée grâce aux enquêtes pour les cultures, et grâce à une estimation visuelle à partir de l’image pour le reste des classes (Tableau 6). Pour les cultures, la proportion de surfaces de soja entraînées est toujours légèrement inférieure au maïs¹⁵, malgré le nombre de ROI de soja plus important. Cela s’explique par le fait qu’il a été plus difficile de trouver des surfaces de soja homogènes, et les ROI de soja sont donc plus petites (Tableau 7).

Finalement, les ROI ont été réparties entre les catégories « aires d’entraînement » (75 % des pixels) et « aires de validation » (25 % des pixels). Ce ratio 75/25 a été choisi afin de s’assurer que le modèle puisse être suffisamment entraîné, les échantillons pour certaines classes étant peu nombreux. Par ailleurs, de nombreuses études utilisent des ratios similaires (Fan et al., 2021). La répartition aléatoire a été choisie car presque toutes les ROI de cultures ont été créées à partir d’observations de terrain, et elles sont donc toutes de même qualité

¹⁵ La classe « maïs » comprend également le sorgho et le mil, mais sera juste appelée « maïs ».

pour la validation. Les pixels de validation et d'entraînement ne sont jamais dans une même ROI, afin d'éviter un biais dû à la corrélation spatiale élevée (Millard & Richardson, 2015). La distribution spatiale des ROI d'entraînement et de validation peut être observée à la Figure 13.

Tableau 7 – Comparaison des ROI de cultures par rapport aux données d'enquêtes. Les pourcentages sont calculés uniquement par rapport à ces quatre classes de cultures.

Culture	% des ROI en surface	Nombre de ROI	% des surfaces des cultures selon enquêtes
Soja	41	120	52
Maïs ¹⁵	43	88	37
Coton	9	36	7
Soja	7	24	4

2.5 Classifications

Après la préparation des données, plusieurs jeux de données (angl. *datasets*) composés de différentes combinaisons de *features* sont créés (Tableau 8). Ils ont été choisis selon la méthode essai-erreur, ce qui signifie que de nombreux autres datasets ont été essayés, mais ne sont pas représentés ici. Le *dataset* 4 contient les huit indices spectraux créés. Étant donné qu'il n'a pas permis d'améliorer significativement l'exactitude globale par rapport au *dataset* 3, le *dataset* 5 a été créé. Celui-ci contient cinq indices ; trois indices ont été retirés, car après analyse visuelle et quantitative, ils apportaient peu d'informations et étaient donc les plus susceptibles d'apporter du bruit. La même réflexion a eu lieu pour les indices de texture (*dataset* 6, 7, 8). Finalement, un dataset combinant les meilleurs indices et indices de texture a été créé (*dataset* 9).

La classification a été réalisée sur le logiciel OTB. Tout d'abord, l'outil « TrainImagesClassifier » est utilisé pour créer le modèle RF (phase d'entraînement). Ensuite, le modèle RF est appliqué sur l'image complète avec l'outil « ImageClassifier », produisant un raster classifié. Le nombre d'arbres choisis pour l'algorithme RF est de 500, conformément à la littérature. Un nombre plus élevé augmenterait linéairement le temps de calcul, sans significativement améliorer les performances (Belgiu & Drăguț, 2016; Gislason et al., 2006; Hamimeche et al., 2021; Lebourgeois et al., 2017; Rodriguez-Galiano et al., 2012). Les autres paramètres de l'algorithme RF sont laissés par défaut.

Tableau 8 – Récapitulatif des datasets utilisés pour la classification. Tous les datasets ont une résolution spatiale de 0.5 m, sauf le numéro 1.

Numéro du dataset	Réflectance	Indice	Texture	Nombre total de features
1	R, G, B, PIR (à 2 m)	NDVI (à 2 m)		5
2	R, G, B, PIR			4
3	R, G, B, PIR	NDVI		5

4	R, G, B, PIR	Tous (8)	12
5	R, G, B, PIR	BNDVI, RI, GNDVI, NDVI, MSAVI2	9
6	R, G, B, PIR	Tous (5)	9
7	R, G, B, PIR	Corrélation de Haralick (3)	7
8	R, G, B, PIR	Energie (2)	6
9	R, G, B, PIR	BNDVI, RI, GNDVI, NDVI, MSAVI2	Energie (2) 11

Une classification en une étape, avec 17 classes, a d'abord été effectuée. Ensuite, un masque des cultures a été produit (classification du village en "zone cultivée" ou "zone non cultivée"). Celui-ci a permis de développer une approche par classifications supervisées successives ou « hiérarchique », avec uniquement les ROI des cultures. La méthode hiérarchique permet d'éviter une contamination entre des classes de cultures et d'autres classes (la végétation herbacée en particulier). Elle permet également d'analyser si certains *features* sont plus adaptés pour différencier les cultures. De plus, en se concentrant uniquement sur les sept classes de cultures avec des signatures spectrales proches, l'algorithme devrait mieux différencier les cultures entre elles.

Après validation des résultats des classifications (III2.6), l'approche la plus performante est sélectionnée. Les zones de vergers et de maraichage, non incluses dans la classification, sont ajoutées manuellement. Les vergers sont ajoutés par photo-interprétation. Les zones de maraichages sont uniquement ajoutées grâce aux points GPS, car elles ne sont pas identifiables par photo-interprétation. La classification à 17 classes (Niveau 4) est reclassifiée en 10 (Niveau 3) puis 5 classes (Niveau 2), et les exactitudes de chacune de ces classifications sont évaluées. Afin d'obtenir le résultat final, le masque comprenant les limites du village est appliqué pour calculer la superficie occupée par chaque occupation du sol à chaque niveau de classification (Figure 15).

Précisons également qu'un filtre majoritaire a été appliqué sur les classifications, afin d'évaluer son effet sur l'exactitude et pour obtenir une meilleure représentation cartographique. Chaque pixel est réaffecté à la classe majoritaire dans laquelle il se trouve (dans notre cas, selon un rayon de 10 pixels).

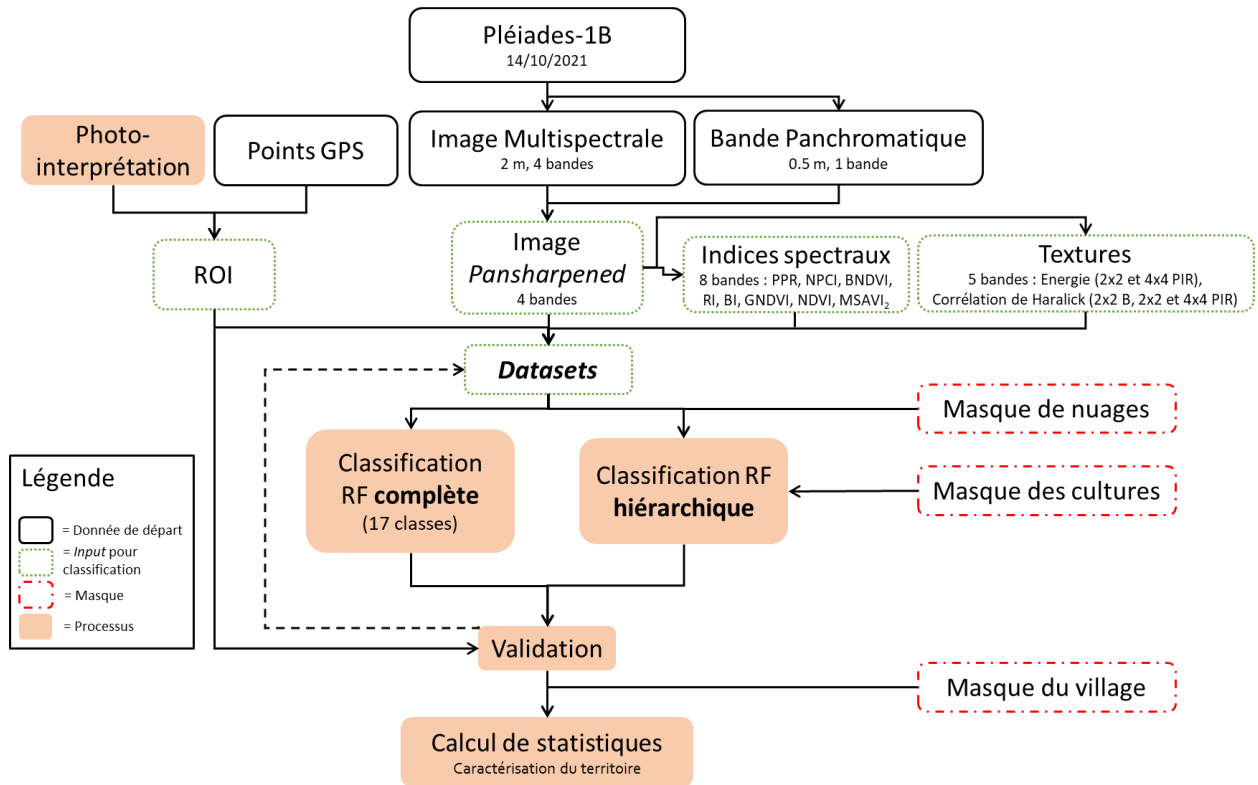


Figure 15 – Workflow global de la méthodologie de classification en une étape et hiérarchique. La flèche en pointillés indique que la validation permet d'améliorer les datasets, afin de trouver le plus performant.

2.6 Evaluation des classifications

Pour évaluer la qualité d'une classification, une matrice de confusion est créée pour chaque classification. Les lignes correspondent aux classes de référence, et les colonnes aux classes prédites (Tableau 9). A partir de cette matrice, plusieurs indicateurs quantitatifs peuvent être calculés. Pour chaque classe, l'exactitude du producteur (angl. *producer accuracy* (PA) ou *recall*), l'exactitude de l'utilisateur (angl. *user accuracy* (UA) ou *precision*) et le F-score sont calculés.

Le PA est obtenu en divisant le nombre de pixels correctement classés pour une certaine classe par le nombre total de pixels de référence pour cette classe (donc la somme de la ligne). C'est donc une mesure du pourcentage de pixels ou de classes sur le terrain qui ont été correctement reconnus. Le UA est obtenu en divisant le nombre de pixels correctement classés pour une certaine classe par le nombre total de pixels prédits pour cette classe (donc la somme de la colonne). Il donne donc une indication sur le pourcentage de pixels bien classés, ou en d'autres mots, la probabilité qu'un pixel classé dans une certaine classe soit effectivement issu de cette classe sur le terrain.

En faisant la moyenne harmonique du PA et UA, le F-score de chaque classe est obtenu (Eq. (3)). Ce chiffre varie de 0 à 1 et est une mesure de la performance d'une classe.

$$F - \text{score} = 2 * \frac{UA * PA}{UA + PA} \quad (3)$$

Ensuite, un indicateur toutes classes confondues est calculé : l'exactitude globale (angl. *overall accuracy* (OA)). Elle est obtenue en divisant le nombre de pixels correctement classés (la somme des pixels se trouvant sur la grande diagonale de la matrice de confusion) par le nombre total de pixels. Ce résultat, exprimé en pourcentage contrairement aux autres indicateurs, donne la proportion globale de pixels classés correctement. L'indice Kappa est parfois utilisé par certains auteurs (Rodriguez-Galiano et al., 2012), mais il a été critiqué et est donc de moins en moins utilisé (Pontius & Millones, 2011). Il ne sera pas utilisé dans cette étude.

Pour permettre une analyse spatiale des erreurs, une carte du degré de confiance est produite. Cette carte donne à chaque pixel la proportion de votes qu'il a reçus pour sa classe. Une proportion de votes faible montre une grande incertitude dans le choix de la classe, tandis qu'une proportion élevée montre que la plupart des arbres étaient d'accord et ont voté pour une même classe.

Tableau 9 – Représentation théorique d'une matrice de confusion. Les cases grisées représentent les pixels correctement prédits.

		Prédiction			
		Classe 1	Classe 2	...	Classe x
Référence	Classe 1	N ₁₁	N ₁₂	...	N _{1x}
	Classe 2	N ₂₁	N ₂₂	...	N _{2x}

	Classe x	N _{x1}	N _{x2}	...	N _{xx}

3 Enquêtes auprès des agriculteurs

3.1 Méthodologie générale

Le questionnaire d'enquêtes fut préparé avant notre campagne de terrain, sur base des enquêtes préalables réalisées par Victorine Djago, puis encodé sur KoBoToolbox. Une fois sur place, il fut essayé avec une personne de référence (Jeanette Sinasanmou, chef des producteurs), dans le but de corriger les questions, de se familiariser à l'utilisation de KoBoCollect, et d'apprendre les coutumes (Figure 16).

Dans chacun des six villages, 30 agriculteurs ont été interrogés, chacun pour une durée moyenne de 30 minutes. Ce nombre a été choisi car il permet d'atteindre une saturation des informations, selon nos observations de terrain et la littérature (Mason, 2010). La méthode d'échantillonnage en boule de neige a été utilisée. L'enquête débutait par un chef de village ou de producteurs. Grâce à ses contacts, nous recrutions d'autres personnes, qui à leur tour nous permettaient de recruter de nouvelles personnes, et ainsi de suite. L'échantillonnage

était également opportuniste, car nous profitons des rencontres sur notre route pour enquêter de nouveaux agriculteurs (Olivier de Sardan, 1995).



Figure 16 – Essai du questionnaire avec Jeanette Sinasanmou (1) et enquête avec l'aide d'un interprète (2)

Même si notre échantillonnage ne peut être considéré comme représentatif de l'ensemble des agriculteurs du village, une attention particulière a été accordée à la juste représentation des femmes et de chaque type d'agriculteur dans chaque village. Afin de pouvoir interroger les personnes ne parlant pas le français, nous étions toujours accompagnés d'un interprète local. Les enquêtes étaient toujours réalisées individuellement, afin d'éviter toute influence extérieure. Finalement, il était toujours signalé aux personnes qu'elles étaient libres de répondre ou non à chaque question, afin de limiter les fausses réponses.

3.2 Questionnaire

L'objectif du questionnaire était triple :

1. Caractériser les agriculteurs et leur exploitation
 1. Identité (nom, âge, sexe, etc.)
 2. Taille du ménage
 3. Type d'exploitation
2. Caractériser les pratiques
 1. Gestion des résidus de cultures
 2. Utilisation du bétail pour l'apport de fertilité
 3. Facteurs limitants de l'apport de MO
3. Quantifier les différents flux de nutriments
 1. Pour les parcelles principales :
 - o Superficie, spéculation, rendement, type de sol, quantité et type de fertilisant apporté, etc.

La liste ci-dessus ne reprend que les éléments principaux de l'enquête, le questionnaire complet se trouve à l'annexe 2.2.

Le questionnaire comprend un volet spécifique aux cultures pluviales et un autre spécifique aux cultures maraichères. Ces volets étaient sélectionnés en fonction du type

d'exploitations. Sur les 177 interrogés, 86 ont répondu uniquement au volet « culture pluviale » (soit 48.6%), 4 ont répondu uniquement au volet « maraichage » (soit 2.3%), et 87 ont répondu aux deux volets (soit 49.2%). Cependant, dans les sections suivantes, nous nous concentrons uniquement sur l'analyse des données relatives aux cultures pluviales, principalement car celles-ci occupent une superficie bien plus importante.

3.3 Analyse des données

Les données d'enquêtes, recueillies sous forme de base de données Excel via KoBoCollect, ont ensuite été manipulées à l'aide de la librairie Pandas (en Python) afin de les homogénéiser.

3.3.1 Unités de mesure locales

Les informations collectées en unités locales (rendements, quantités de fertilisant, etc.) ont été converties en unités du système international à l'aide des relations établies par Kante (2001), reprises dans le Tableau 10.

Tableau 10 – Conversion des unités de mesure locales en kilogramme (adapté de Kante, 2001).

Unités de mesure locales	kg
Sac de récolte (100 ± 10 kg)	100
Sac de fertilisant (50 kg)	50
Tricycle	300
Une bassine de récolte	25
Brouette de MO	20

3.3.2 Quantité de N et P dans les engrais minéraux

Différents types d'engrais minéraux sont utilisés par les agriculteurs (NPK 15-15-15, NPK 14-23-14, urée, etc.). La conversion des différents engrais en quantité d'azote et de phosphore permet d'évaluer l'apport en nutriment indépendamment du type d'engrais (IFA, 2016). Elle a été réalisée en suivant la méthode décrite par Center for Agriculture, Food, and the Environment (2015) :

1. La quantité d'engrais appliquée est multipliée par la proportion d'azote ou d'oxyde de phosphore (P_2O_5) de l'engrais. Pour l'urée, la valeur de 45,5 % est utilisée (Alley & Vanlauwe, 2009). Pour les engrais NPK dont les proportions n'étaient pas connues par l'agriculteur, nous avons considéré que du NPK 14-23-14 avait été appliqué¹⁶.
2. Cette quantité est ensuite multipliée par 1 et 0,437 pour N et P_2O_5 respectivement, pour tenir compte de la teneur en N et P des éléments.

¹⁶ Ces proportions correspondent au NPK utilisé pour le coton qui est subventionné par l'état béninois. Son utilisation est donc très fréquente même dans d'autres cultures que le coton.

Par exemple, pour un fertilisant NPK X-Y-Z, appliqué en quantité F [kg] sur un champ, la quantité de P appliqué (Q_p) est donné par l'équation suivante :

$$Q_p[kg] = F * Y/100 * 0,437 \quad (4)$$

3.3.3 Classification des sols intervillage

Le type de sol est aussi une variable potentiellement importante pour l'analyse. Cependant, les noms des sols décrits par les guides étaient différents dans chaque village à cause des différentes langues locales. Afin de permettre une comparaison intervillage, des noms de sol communs ont été donnés à chaque nom de sol local afin de les regrouper sur base de leurs caractéristiques principales. La conversion se base sur une description des sols locaux réalisée par Victorine Djago lors des enquêtes de 2020. Cette nouvelle nomenclature, utilisée pour l'analyse ultérieure, est présentée au Tableau 11.

Tableau 11 – Nouvelle nomenclature utilisée pour comparer les sols des différents villages.

Nom commun	Points communs entre villages	Topographie
Gravillonnaire	Gravillonnaire, sol de montagne	Proche de la montagne
Caillouteux-rouge	Petits cailloux (latérite), un peu de sable, souvent de couleur rouge	Haut de pente, bas de pente, pente, plateau
Sableux	Sableux, pauvre en MO	Plateau
Sablo-argileux	Sablo-argileux, souvent de couleur jaune ou blanche (faible infiltration)	Plateau, bas-fonds, haut de pente
Argileux	Sol très argileux	Plateau
Bas-fonds	Bas-fonds, rétention d'eau, riche en MO	Bas-fonds

Note : pour les noms locaux utilisés dans chaque village, voir l'annexe 4.

3.3.4 Cultures associées et surface effective des parcelles

Dans le cas où les agriculteurs pratiquaient l'association de culture, le pourcentage que représente chaque spéculation dans la parcelle leur a été demandé. Ce nombre a ensuite été utilisé pour calculer la surface effective de chaque spéculation, c.-à-d. la taille de la parcelle complète multipliée par la fraction de la parcelle que couvre une spéculation.

Dans ce travail, tous les résultats (rendements, application d'engrais, etc.) seront exprimés par unité de surface effective afin de pouvoir comparer les parcelles en mono- ou association de culture. Pour les applications d'engrais sur les cultures pluviales, sur base de nos connaissances du terrain, nous avons considéré que seule la culture principale reçoit la dose d'engrais. Par exemple, si un paysan déclare avoir mis 30kg d'engrais sur une parcelle de 2 ha avec une association de maïs (60%) et d'arachides (40%), on considère que le maïs reçoit les 30 kg sur 1.2 ha, soit une dose de 25 kg/ha (Tableau 12).

Tableau 12 – Illustration de la correction appliquée pour les cultures associées.

Parcelle ID	Spéculation	% spéculation	Engrais [kg]	Superficie [ha]	Superficie effective [ha]	Dose effective [kg/ha]
1	Maïs	60%	30	2	1.2	25
1	Arachides	40%	0	2	0.8	0

3.3.5 Traitement des valeurs aberrantes

Après avoir tenu compte de ces conversions (unité, fertilisant minéral, association de culture, et type de sol), les valeurs aberrantes (angl. *outliers*) ont été identifiées par une analyse visuelle (*boxplot*) combinée à nos connaissances du terrain. Ces *outliers* ont été éliminés du jeu de données pour ne pas fausser les résultats (Aguinis et al., 2013). Des analyses de variances (réalisées en R) ont permis de déterminer les facteurs influençant les rendements et d'établir des moyennes de rendement et d'application de fertilisant par occupation de sol.

3.3.6 Calcul des rendements

Pour les calculs de rendements, seules les spéculations pour lesquelles nous disposions de plus de cinq observations ont été conservées. Les observations pour les champs de fonio, sésame et pois d'angole n'ont donc pas pu être prises en compte. Les observations pour le sorgho rouge et le sorgho blanc ont été regroupées en une seule catégorie « sorgho R-B », car très peu d'observations ont été recensées pour le sorgho blanc. Pour le maïs, le coton, le niébé et le soja, nous disposions d'assez d'observations par village (Tableau 48, annexe 7) que pour établir des moyennes de rendements par village et tester leurs significativités. Pour les autres, seules les moyennes par spéculation ont été établies. Le plan d'expérience est non complet et non balancé, et il y a une grande colinéarité possible entre les facteurs explicatifs du rendement. Ces éléments rendent l'analyse statistique compliquée ; c'est pourquoi les autres facteurs n'ont pas été étudiés en profondeur.

3.3.7 Fertilisation minérale

Le pourcentage de surface fertilisé chimiquement ($\%SF_{min}$) a été calculé pour chaque village et chaque spéculation. Pour les parcelles qui reçoivent une application d'engrais, la dose moyenne de fertilisant a été estimée ($\mu_{fertilisation_min}$). L'estimation a été faite uniquement pour les spéculations pour lesquelles nous disposions de plus de trois observations (Tableau 49, annexe 7). Pour le maïs, les moyennes ont pu être établies par village, car le nombre d'observations était suffisant.

3.3.8 Gestion des résidus de culture

Pour chaque type de résidu (feuilles, tiges, etc.) de chaque type de culture principale (légumineuses, coton, céréales et tubercules), sur base des données d'enquêtes, on calcule le pourcentage moyen dédié à chaque utilisation recensée (voir exemple dans Tableau 13).

Tableau 13 – Méthodologie pour déterminer le pourcentage de chaque résidu dédié à chaque utilisation.

	Utilisation du résidu X pour la plante Y		
	% brûlé	% sur champ	% au bétail
<i>Agriculteur 1</i>	40	0	60
<i>Agriculteur 2</i>	90	10	0
<i>Agriculteur 3</i>	0	10	90
<i>Agriculteur 4</i>	30	0	70
Moyenne	40%	5%	55%

4 Échantillonnage des ressources organiques

Pour préparer la méthodologie de quantification des ressources organiques (échantillonnage et enquête), une revue de littérature sur les méthodes existantes a été réalisée. Elle n'a pas été incluse dans la partie I de ce travail car elle n'est pas essentielle à la bonne compréhension du mémoire, mais elle se trouve en complément d'information dans l'annexe 1.

4.1 Résidus de culture

Une campagne d'échantillonnage de résidus de culture a été réalisée. Les mesures se sont concentrées sur les cultures les plus importantes du village. L'objectif est d'estimer des rendements moyens en résidus de culture.

Pour ce faire, des parcelles de culture à maturité ont été visitées avec leur exploitant. Les caractéristiques de chaque parcelle – comme la superficie (estimée visuellement), la ou les spéculations, le pourcentage de chaque culture en cas d'association, la topographie, le type de sol et la fertilisation – étaient enregistrées à l'aide d'un formulaire KoBoCollect. Entre 2 et 4 quadrats de 4 à 25 m² ont été choisis à plus de 10 m des bords. Le nombre et la taille des quadrats étaient choisis en fonction de l'hétérogénéité et la densité de la végétation dans la parcelle (Sapkota et al., 2016). Les quadrats étaient choisis de manière non aléatoire afin de couvrir l'hétérogénéité de la parcelle. Typiquement, un quadrat était prélevé dans chaque catégorie de rendement (relativement faible, moyen et haut rendement). Ce choix avait pour but initial d'établir une régression entre les valeurs NDVI et le rendement par quadrat. La végétation de chaque quadrat a été récoltée intégralement et chacune des parties (tiges, feuilles, grains, etc.) a été pesée séparément à l'aide d'une balance de type Electronic SF-400, précise au gramme près. Un sous-échantillon de chaque parcelle et de chaque partie de plante a ensuite été séché au soleil durant 7 à 9 jours dans un sac en tissu synthétique. Le volume de sous-échantillon était faible (de l'ordre de 200 g) et régulièrement mélangé afin de permettre un séchage efficace et homogène malgré le manque d'étuve. La matière sèche de chaque sous-échantillon était finalement pesée afin d'estimer la relation masse fraîche/masse sèche. Cette relation a permis de calculer la masse sèche par quadrat de chaque partie de plante (Figure 17).

Finalement, une analyse statistique a permis d'établir des moyennes de rendements en résidus par spéculatation. Seule la moyenne pour le maïs a été réalisée, car les nombres de parcelles étaient insuffisants pour les autres (Tableau 14). Pour le coton, le soja et le riz (autres cultures importantes de Gonri), les rendements moyens déclarés ont été combinés aux indices de récolte de la littérature afin d'obtenir le rendement en résidus de culture.

Tableau 14 – Nombre de carrés d'échantillonnage réalisés par partie de plante (tiges, feuilles, etc.) et par spéculatation, et nombre total de parcelles échantillonnées.

	Coton	Igname	Maïs	Soja
Feuilles	0	8	23	0
Gousses	3	0	0	6
Spathes	0	0	23	0
Tiges	3	0	23	6
Produits de récolte	3	12	21	6
Nombre de parcelles	1	3	9	2



Figure 17 – Les étapes de l'échantillonnage des cultures : (1) récolte pour une parcelle de maïs (la ligne jaune au sol délimite le quadrat de 4m²), (2) récolte pour une planche de piment, (3) le moyen de transport pour ramener les quadrats de maïs récoltés au village, (4) les enfants aidant à trier la récolte par type de résidu (feuilles, tiges et spathes ici), (5) le séchage des résidus dans les sacs au soleil, et (6) la pesée de la matière sèche.

4.2 Biomasse herbacée

L'objectif de cette partie du travail de terrain est d'estimer la quantité de ressources fourragères disponibles à l'échelle du village. La méthodologie appliquée est adaptée de Djaby (2010) et Yaméogo et al. (2004) et est illustrée à la Figure 18.

Des zones de pâturage ont été repérées avec l'aide des guides locaux. Parmi celles-ci, des zones avec des faciès différents ont été sélectionnées pour être échantillonnées. Dans le cadre de cette étude, un faciès peut être défini comme une unité de paysage homogène, caractérisé principalement par le type de sol et les structures et densités du couvert végétal (herbacé et ligneux).

Pour un faciès donné, un carré de 30x30m est délimité à l'aide d'un mètre ruban. Deux transects de 30 m de long sont tracés dans ce carré. Dans un premier temps, un transect est parcouru en stratifiant chaque quadrat de 1 m². Les quadrats reçoivent tous une note entre un et cinq en fonction de la densité et hauteur du couvert herbacé. Ces informations sont encodées directement dans un fichier Excel sur une tablette pour faciliter le travail et les calculs qui suivront (exemple donné au Tableau 44, annexe 5). Dans un second temps, deux quadrats représentatifs de chaque strate sont récoltés intégralement (pour chaque carré de 30x30m). La masse fraîche de chaque quadrat est pesée. Un sous échantillon (de l'ordre de 100 g) est prélevé pour chaque strate et mis à sécher afin d'estimer la relation masse fraîche/masse sèche (voir section III.4.1). En pondérant la masse sèche moyenne de chaque strate par sa fréquence dans les deux transects, on obtient la quantité de fourrage à l'hectare pour le faciès (Mg MS/ha).



Figure 18 – Les étapes de l'échantillonnage de la biomasse herbacée : (1) repérage d'une zone de pâturage, (2) observation de la strate de chaque quadrat de 1 m² le long du transect de 30 m, (3) récolte intégrale de la biomasse herbacée d'un quadrat, et (4) séchage et pesée des sous-échantillons.

Cette méthodologie permet d'estimer la biomasse herbacée totale dans un quadrat de 30x30m, de manière relativement précise, mais sans devoir récolter l'intégralité des 900 m². Or, cette échelle est compatible avec la résolution spatiale des images Sentinel-2 (S2) (10x10m). Cela laisse donc la liberté, soit d'estimer une moyenne de biomasse par faciès et de

l'appliquer à l'ensemble du terroir, soit d'établir une relation entre la biomasse mesurée et la valeur de NDVI d'une image S2 pour l'appliquer à toute l'image de la zone. Les images S2 n'ont finalement pas été utilisées à cause de la couverture nuageuse importante. Une analyse statistique a donc permis d'établir une moyenne de rendement en biomasse herbacée, qui sera combinée à la cartographie du terroir pour quantifier la biomasse totale.

4.3 Biomasse foliaire ligneuse

Dans un premier temps, sur le terrain, nous avons pris un grand nombre de mesures de diamètre de couronne et de circonférence de tronc afin d'évaluer la biomasse foliaire par relation allométrique. Cependant, l'identification des espèces était trop compliquée sans l'aide d'un expert, rendant l'utilisation des relations allométriques impossible. L'estimation de la biomasse foliaire s'est donc basée sur des valeurs moyennes de production par hectare de forêt trouvée dans la littérature scientifique. Une série de valeurs se rapprochant du contexte de cette étude sont données dans le Tableau 42 (annexe 1). Les valeurs finalement choisies sont tirées de Scurlock (2002). Dans cette étude, la production annuelle de biomasse foliaire des ligneux est estimée à 430 et 5530 kg/ha/an pour la savane herbeuse et la forêt claire respectivement.

La méthodologie d'échantillonnage a tout de même été utile afin d'estimer le pourcentage de la biomasse foliaire appétée par les animaux de la région, c.-à-d. le coefficient d'appétibilité. Deux méthodes d'échantillonnage ont été utilisées. L'une pour les arbres en champ et l'autre pour les arbres et arbustes des savanes.

4.3.1 Arbres en champs

Des champs représentatifs de l'ensemble des villages ont été sélectionnés. Dans chaque champ, pour l'ensemble des arbres qui se trouvaient au sein du champ, nous avons encodé l'espèce de l'arbre (si reconnaissable), son diamètre de couronne, et si cette espèce est appétée ou non par les animaux. Pour connaître cette dernière information, nous avons fait appel à nos guides locaux ou aux éleveurs que nous croisons.

Ces mesures ont permis d'estimer la surface totale de couronne d'arbre et la surface de couronne d'arbre appétée (en champ) par les animaux. Le pourcentage de surface de couronne appétée ainsi obtenu pourra être utilisé comme coefficient d'appétibilité.

4.3.2 Arbres et arbustes en savane

Dans ce cas-ci, des transects de 30 à 100 m de long et de 4 m (pour les arbustes) ou 20 m (pour les arbres) de large ont été sélectionnés dans différents faciès. Pour chaque arbre ou arbuste du transect, nous avons encodé son espèce (si reconnaissable), son diamètre de couronne, et si cette espèce est appétée par les animaux ou pas. Le coefficient d'appétibilité a donc pu être calculé comme à la section précédente (4.3.1).

5 Bilan de nutriments à l'échelle du terroir

5.1 Définition du système

5.1.1 Limites du système

Pour la réalisation de ce bilan, l'échelle du terroir villageois et du système animal-sol-plante a été choisie. L'étude se concentrera sur une seule saison de culture. Ce choix est justifié par la dynamique locale des flux de MO, et par la disponibilité des données. Finalement, deux éléments ont été identifiés comme les plus importants lors de notre revue de littérature : l'azote et le phosphore (Pierzynski et al., 2017).

Pour le village de Gonri, le bilan se concentrera sur les zones de savane, de forêt et les cultures les plus importantes, c.-à-d. celles qui représentent plus d'1 % de la surface cultivée selon la surface agricole totale des 30 répondants à nos enquêtes (Tableau 15)

Tableau 15 – Spéculation les plus importantes de Gonri selon les enquêtes.

Spéculation	Surface déclarée (ha)	Pourcentage ¹
Soja	73.0	50 %
Maïs	49.6	34 %
Riz	9.2	6 %
Coton	6.0	4 %

¹(de la SAU totale déclarée par les producteurs)

5.1.2 Equation globale du bilan

Une représentation schématique des flux du bilan est donnée à la Figure 19. On distingue trois parties différentes pour le bilan : les apports de nutriments sur les champs (*input*), les pertes ou exportations de nutriments des champs (*output*), et le recyclage des

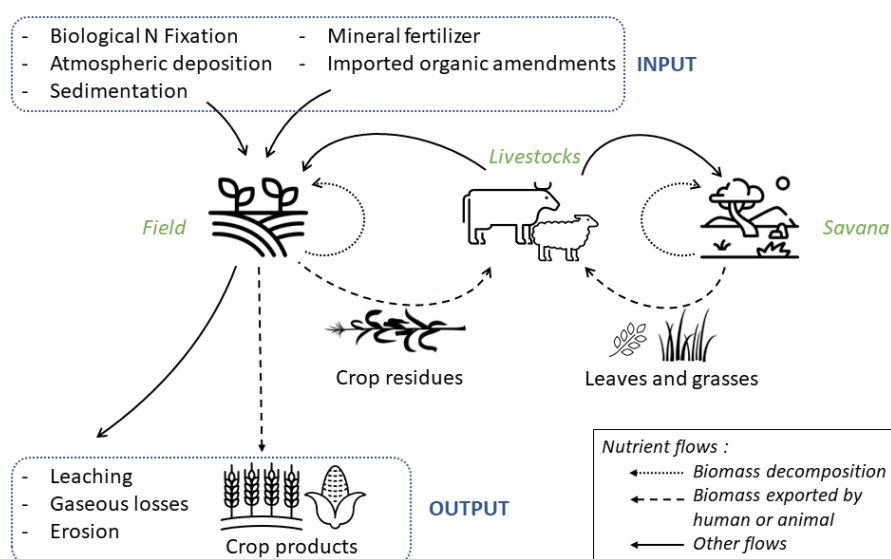


Figure 19 – Représentation schématique des flux et bilans de nutriments pour l'agriculture africaine à l'échelle du terroir. Les flèches représentent les flux. Les encadrés représentent les apports (*input*) et les pertes (*output*) de nutriments par rapport aux champs. Le recyclage des nutriments a lieu principalement par le bétail à partir des résidus de culture et des fourrages des savanes. Cette biomasse peut aussi se décomposer sur place.

nutriments au sein du système. Ce recyclage se fait principalement avec l'aide du bétail, qui va manger les résidus de culture ainsi que les feuilles et herbes des savanes et les rejeter sur les champs et/ou les savanes. Cette biomasse peut aussi se décomposer sur place.

La Figure 19 montre un système particulier, mais certains flux peuvent être modifiés en fonction des pratiques agricoles. Les différents scénarios de gestion de la fertilité seront discutés à la section III5.4.

Les différents flux de nutriments (Tableau 16) sont utilisés pour définir deux types de bilan : partiel ou complet. Pour le premier, seuls les *inputs* et *outputs* 1 et 2 sont utilisés. Pour le second, l'ensemble des cinq *inputs* et *outputs* sont considérés - Eq. (5) -. Dans les deux cas, le bilan est calculé en soustrayant la somme des *outputs* à la somme des *inputs* pour les nutriments N et P (Stoorvogel & Smaling, 1990, cité dans Tovihoudji, 2018).

Tableau 16 – Termes d'un bilan complet de nutriments et leurs abréviations utilisées dans ce travail.

Code	Flux
Inputs	
1 Min	Fertilisants minéraux
2 Org	Fertilisants organiques importés ¹⁷
3 Dépo	Déposition atmosphérique
4 BNF	Fixation d'azote atmosphérique
5 Sédi	Sédimentation
Outputs	
1 Prod	Produits de récolte
2 Rés	Résidus de culture
3 Lixi	Lixiviation
4 Gaz	Pertes par émissions gazeuses
5 Éro	Érosion

$$BN_{complet,s,n} = \sum_{i=1}^5 input_{s,n,i} - \sum_{i=1}^5 output_{s,n,i} \quad (5)$$

Avec s la spéculation et n un nutriment donné. Dans la section suivante, sauf contraindication, tous les termes sont exprimés par spéculation et par nutriment, mais les indices s et n ne seront pas repris dans chaque équation pour ne pas alourdir les notations.

5.2 Estimation des termes du bilan

L'estimation de chacun des termes du bilan (en kg/ha) est faite sur base de mesures du terrain ou de relations tirées de la littérature. Cette section détaille chaque calcul.

¹⁷ Dans le cadre de ce travail, une différence est faite entre la fertilisation organique directe via le bétail qui divague dans les champs (qui sera discuté à la section III5.3) et l'apport de fertilisant organique par le producteur qui récolterait le fumier et l'éprendrait sur son champ (mesuré par les enquêtes).

5.2.1 Fertilisation minérale – IN 1

Les données d'enquête ont été utilisées pour estimer la quantité de N et P appliquée (cf. section III.3.6). D'une part, le pourcentage de surface cultivée fertilisée chimiquement ($\%SF_{min}$) a été calculé pour chaque spéculation. Pour toutes les cultures (sauf le maïs et le coton), de grandes différences existent entre les villages (coefficient de variation supérieur à 20 % ; Djaby, 2010). Les valeurs spécifiques à Gonri ont donc été utilisées sauf dans le cas où nous disposons de trop peu de données que pour établir une moyenne valide (moins de 3 parcelles). Dans ce cas la moyenne de l'ensemble des villages est utilisée. D'autre part, $\mu_{fertilisation_min}$, la dose moyenne de fertilisants par spéculation (calculée sur base des surfaces fertilisée uniquement), a été utilisée.

Le terme IN_{min} est donc estimé pour chaque spéculation avec l'équation (6) :

$$IN_{min} = \%SF_{min} * \mu_{fertilisation_min} \quad [\text{kg/ha}] \quad (6)$$

5.2.2 Fertilisation organique – IN 2

Ce terme est estimé de la même manière que le précédent (IN_{min}) : pour chaque spéculation, le pourcentage de surface fertilisée organiquement ($\%SF_{org}$) et la dose moyenne ($\mu_{fertilisation_org}$, calculé sur base des surfaces fertilisées uniquement) sont estimés sur base des enquêtes. Ensuite, la dose moyenne d'engrais est convertie en quantité de N et P sur base des teneurs en nutriment des différents amendements ($teneur_{Nu}$). Les teneurs sont tirées de la littérature (Tableau 17).

Tableau 17 – Teneurs en matière sèche (MS), en azote et en phosphore de quelques fertilisants organiques (Vlaming & Heesmans, 2019)

Fertilisant organique	MS (g/g)	N [g/g MS]	P [g/g MS]
fumier bovin	0.35	0.0079	0.001
fumier de poule	0.8	0.0179	0.019
compost	0.45	0.022	0.004

Le terme IN_{org} est obtenu pour chaque spéculation avec l'équation (7) :

$$IN_{org} = \%SF_{org} * \mu_{fertilisation_org} * teneur_{Nu} \quad [\text{kg/ha}] \quad (7)$$

5.2.3 Déposition d'azote atmosphérique – IN 3

L'apport de nutriments par déposition atmosphérique peut se faire de deux manières : déposition sèche ou humide (Tovihoudji, 2018). Ces apports sont considérés comme indépendants du type de culture.

Pour N et P, la déposition humide est souvent calculée selon la formule développée par Ridder et al. (1982)¹⁸ sur base de la précipitation annuelle (donnée en mm/an) :

¹⁸ Cité dans Tovihoudji, 2018

$$N_{depo-hum} = 0.0065 * Pr\acute{e}cipitation\ annuelle\ [kg/ha/an]$$

$$P_{depo-hum} = 0.0007 * Pr\acute{e}cipitation\ annuelle\ [kg/ha/an]$$
(8)

Pour la zone d'étude, la valeur obtenue est de 6.8 et 0.7 kg/ha/an pour N et P respectivement. La quantité de N et P apportée par déposition atmosphérique sèche pour une zone subhumide, comme le nord du Bénin, est estimée à 1.1 et 0.3 kg/ha/an, respectivement (Ramsperger et al., 1998; Herrmann et al., 2010)¹⁸. Le flux *OUT dépo* est calculé comme la somme de la déposition atmosphérique sèche et humide, c.-à-d. 7.9 et 1.0 kg/ha/an pour N et P, respectivement.

5.2.4 Fixation d'azote biologique – IN 4

La fixation d'azote biologique peut être un terme important du budget, surtout pour les cultures de légumineuse (Zhang et al., 2015). Ce terme est lui aussi divisé en deux parties : la fixation symbiotique et asymbiotique. La première s'applique à tout type de cultures et est estimée par la relation de Roy et Misra (2003)¹⁸ sur base de la précipitation annuelle (donnée en mm/an) :

$$IN\ bnf = 0.5 + 0.1 * \sqrt{Pr\acute{e}cipitation\ annuelle\ [kg/ha]}$$
(9)

Dans notre cas, cette valeur est de 3.7 kg/ha/an.

La fixation symbiotique ne s'applique qu'aux légumineuses. Une méthode courante est de considérer qu'une certaine part de l'azote total contenu dans la plante provient de la fixation symbiotique (Alley & Vanlauwe, 2009; Bouwman et al., 2017; Peoples et al., 2021; Zhang et al., 2020). Cette fraction, souvent abrégée *%Ndfa*, varie entre 60 et 80% en fonction des légumineuses et des régions du monde (Zhang et al., 2020). Pour le bilan de Gonri, seul le soja est concerné. Le *%Ndfa* du soja a été estimé à 61% pour l'ASS par Peoples et al. (2021).

La biomasse aérienne totale moyenne pour le soja est calculée sur base des données d'enquête et d'échantillonnage. Pour tenir compte de la biomasse racinaire, le ratio biomasse racinaire - biomasse aérienne de 0.19 est utilisé (Bouwman et al., 2017). L'azote total fixé est finalement obtenu en multipliant le *%Ndfa* par la somme de l'azote contenu dans les grains, les résidus et les racines.

5.2.5 Sédimentation et érosion – IN 5, OUT5

L'apport de nutriments par irrigation, ruissellement et sédimentation est dû à l'eau d'irrigation et de ruissellement. Dans la zone d'étude, l'irrigation des cultures pluviales n'est pas pratiquée. Le ruissellement de l'eau de pluie et l'érosion peuvent aussi engendrer des pertes de nutriments. Dans le cadre de ce travail, ces deux flux ne seront pas pris en compte.

5.2.6 Produits de récolte – OUT 1

Le terme « produits de récolte » se rapporte aux éléments récoltés sous forme de graines, de fruits, tubercules, etc., qui sont prélevés par les agriculteurs. Ces nutriments sont considérés comme exportés du système.

Les moyennes de rendement en grains ont été calculées sur base des données d'enquête. Le rendement est ensuite multiplié par la concentration en azote et phosphore des grains trouvée dans la littérature (Tableau 18).

5.2.7 Résidus de culture – OUT 2

Les résidus de culture sont les parties aériennes de la plante qui ne sont pas utilisées directement par les agriculteurs. Ils peuvent être brûlés, mangés par les animaux, restitués au sol, etc. Le rendement moyen en résidus de chaque spéculiation est obtenu grâce à l'échantillonnage réalisé sur le terrain. Les teneurs en nutriments de ces résidus sont tirées de la littérature (Tableau 18). On définit %*RésExp* comme le pourcentage de résidus qui est exporté du champ. Cette fraction est fonction des pratiques agricoles locales et sera adaptée en fonction des hypothèses du bilan. La quantité de nutriments exportés du système via les résidus de culture (OUT2) est finalement calculée en multipliant le rendement en résidus par leur concentration en nutriments et par le pourcentage de résidus exportés.

Tableau 18 – Concentration en azote et phosphore des produits de récolte et résidus de culture (d'après Bouwman et al., 2017)

Spéculiation	Concentration en nutriments [g/g MS]			
	Produits de récolte		Résidus de culture	
	N	P	N	P
<i>Soja</i>	0.062	0.005	0.011	0.0027
<i>Maïs</i>	0.014	0.0029	0.011	0.002
<i>Coton</i>	0.029	0.0053	0.0117	0.0016
<i>Riz</i>	0.013	0.0025	0.0067	0.0009

5.2.8 Lixiviation – OUT 3

Les pertes par lixiviation s'appliquent ici uniquement à l'azote. Les pertes de phosphore sont négligeables car il est peu mobile, surtout dans les sols tropicaux à cause de sa fixation par les (oxy-)hydroxydes de fer/aluminium (Tovihoudji, 2018). En l'absence de mesures directes, ces pertes annuelles (kg/ha/an) sont estimées sur base de la fonction de transfert développée par De Willigen (2000)¹⁸ :

$$OUT_{lixi} = 21.37 + (P/C * L) * (0.0037 * Nf + 0.0000601 * OC - 0.00362 * Nu) \quad (10)$$

Avec :

- *P* les précipitations annuelles en mm/an,
- *C* la teneur en argile de la couche supérieure du sol (%),
- *L* la profondeur d'enracinement (m),

- N_f l'azote appliqué par fertilisation organique ou minérale,
- OC la teneur en carbone organique de la couche supérieure du sol (%),
- N_u la quantité d'azote prélevée par la plante (kg/ha),

Les valeurs de L par spéculation sont obtenues à partir de FAO (1998). N_f et N_u sont estimés sur base des enquêtes. Des mesures de C et OC ont été réalisées par Victorine Djago. Ces données ont été analysées statistiquement. Les valeurs moyennes par village ont été utilisées car elles étaient significativement différentes entre villages (Figure 20 ; $F_{val}=5.2$, $P_{val}=0.0005$ pour OC , et $F_{val}=3.7$, $P_{val}=0.005$ pour C).

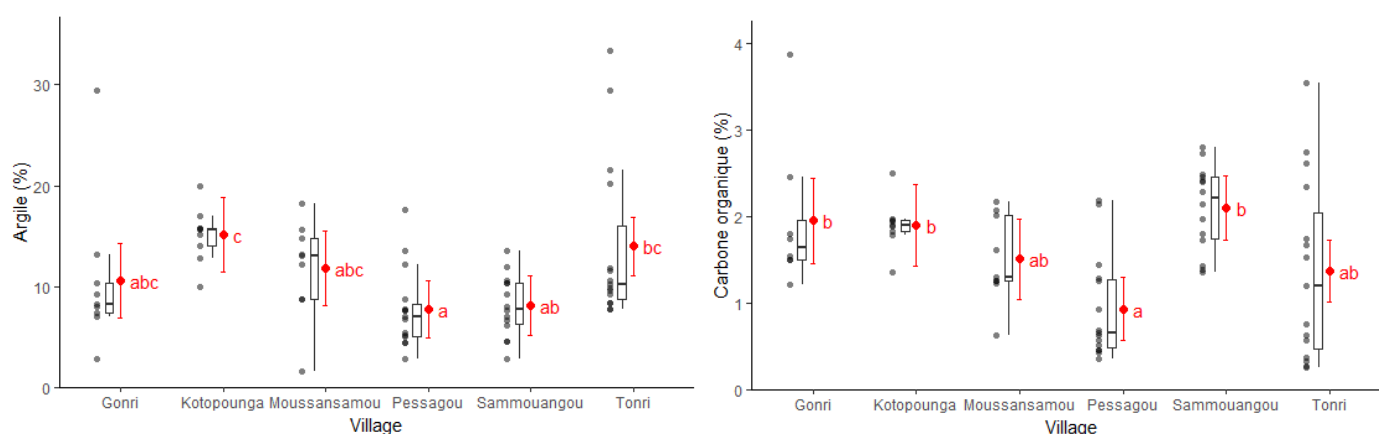


Figure 20 – Teneurs en argile (gauche) et carbone organique (droite) des 15 premiers cm du sol des villages de la zone d'étude (d'après les données mesurées par Victorine Djago).

Les valeurs obtenues sont 0, 4.5, 14.1 et 26 kg/ha/an pour le soja, le maïs, le riz et le coton respectivement.

5.2.9 Émission gazeuse – OUT 4

Les pertes de nutriments par émissions gazeuses sont dues au phénomène de dénitrification ou aux pertes directes par volatilisation de l'ammoniaque. Seul l'azote est considéré (Tovihoudji, 2018). Ce terme est difficile à quantifier par mesure directe (Zhang et al., 2020). Le modèle de régression de Roy et Misra (2003)¹⁸ a été choisi pour estimer ce terme sur base de l'urée appliquée :

$$OUT_{gaz} = (0.025 + 0.000855 * P + 0.01725 * F + 0.0117 * OC) [kg/ha] \quad (11)$$

Avec P , les précipitations annuelles (mm/an), F , la dose d'azote appliquée via l'urée (kg/ha), et OC , la teneur en carbone organique du sol (%).

5.2.10 Variation du stock de nutriments

La variation du stock de nutriments dans le sol peut être mesurée de manière directe, via la mesure de concentration en nutriments dans le sol, ou indirecte, à l'aide d'isotopes (Zhang et al., 2015). Cependant, au vu du système agricole peu intensif et de la courte période du bilan (un an), cette variation sera considérée comme négligeable.

5.3 Recyclage des nutriments par le bétail

La section précédente détaille la méthode de bilan des nutriments qui a été appliquée par spéculation par spéculation, uniquement pour les zones agricoles cultivées. Cependant, ce bilan ne tient pas encore compte du recyclage des nutriments par le bétail au sein du système. En effet, les animaux prélèvent des nutriments en s'alimentant dans les savanes (ou les champs), puis ces nutriments peuvent être restitués aux champs via leurs déjections. Cette section a pour but de calculer la quantité de nutriments qui pourrait être retournée aux champs grâce au bétail. Dans un premier temps, il convient d'évaluer la quantité de fourrage du terroir. Ensuite, la conversion des nutriments des fourrages en déjection animale est étudiée.

5.3.1 Estimation du potentiel fourrager du terroir

La section III4 a permis d'obtenir une mesure de biomasse herbacée et foliaire pour un moment donné de l'année. Cependant, la quantité de fourrage mangeable par le bétail sur une année ne se limite pas à cette mesure ponctuelle. La dynamique saisonnière de la végétation doit être prise en compte. Pour ce faire, plusieurs méthodes existent. Certains auteurs considèrent que la production annuelle de fourrage d'un faciès correspond à la quantité de fourrage mesurée au pic de végétation (ou fin de saison de croissance), alors que d'autres utilisent la somme des biomasses mesurées à intervalles réguliers durant toute la saison de croissance. Certains considèrent la matière végétale morte au sol et d'autres uniquement la biomasse sur pied (Grossman, 1982). Dans ce travail, nous considérerons que la biomasse fourragère annuelle correspond à la biomasse au pic de végétation.

Les mesures de biomasse de cette étude ont été réalisées entre le 10 août et le 3 septembre. Toutefois, la fin de la saison de croissance se situe plutôt vers la fin du mois de septembre. Un facteur de correction a donc été appliqué aux mesures de terrain afin de tenir compte de ce décalage. Ce facteur a été calculé sur base des données disponibles dans la littérature scientifique. L'étude choisie est la thèse de Sinsin (1993), car elle correspond bien à la zone d'étude en termes de latitude, de pluviométrie et de dynamique de végétation. Dans cette thèse, des coupes de végétation par quadrat ont été réalisées tous les 30 jours dans différents faciès de savane. Le rapport entre la biomasse au pic de végétation et celle au milieu du mois d'août a donc pu être calculé (« rapport max/août », Tableau 19). Les faciès qui nous intéressent le plus dans cette étude sont les n°4-5 et 6-7. Les

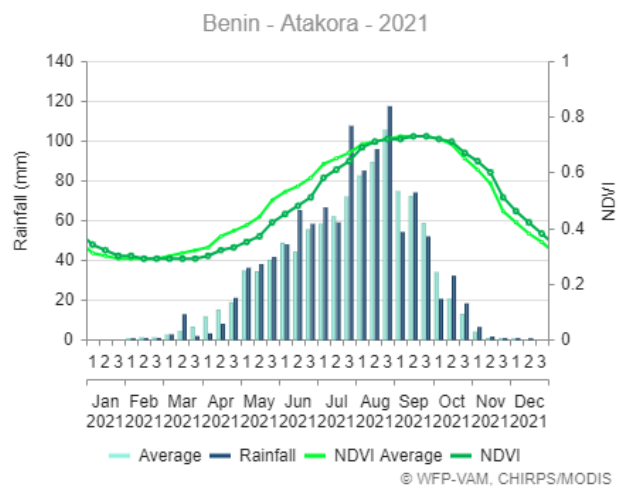


Figure 21 – La courbe NDVI illustre la dynamique saisonnière de la végétation pour la zone d'étude pour 2021 et en moyenne sur 30 ans. Le pic de végétation a lieu après le pic de pluviométrie (WFP, 2021).

moyennes deux à deux ont donc été calculées. Elles sont de 2.26 et 1.77 pour les savanes herbeuses et forêts claires, respectivement. Ce rapport moyen a été multiplié par nos mesures de terrain pour tenir compte de la croissance entre mi-août et le pic de végétation. Notons que les calculs de cette section (5.3.1) sont valables pour la biomasse herbacée uniquement. Pour la biomasse foliaire ligneuse, les valeurs proviennent de la littérature (cf. III.4.3).

Tableau 19 – Données utilisées pour le calcul du rapport entre la biomasse herbacée récoltée mi-août et au maximum de végétation selon Sinsin (1993).

N°	Type de végétation	Topographie	Biomasse herbacée [Mg/ha]		Rapport max/août
			Mi-août	Maximum	
1	Jachère humide	Bas-fonds	5.0	10.1	2.02
2	Savane humide	Bas-fonds	5.0	9.8	1.96
3	Forêt galerie	Lits de rivière	5.6	15.8	2.81
4	Jachère	Plateaux	3.5	7.3	2.11
5	Savanes arbustives/herbacées	-	2.9	6.9	2.41
6	Forêt claire	-	3.1	5.2	1.71
7	Forêt claire/savane boisée	-	3.0	5.6	1.84
Moyenne					
	Globale		4.0	8.7	2.12
4-5	Savane herbacée & jachère		3.2	7.1	2.26
6-7	Forêt claire		3.0	5.4	1.77

Afin d'évaluer l'incertitude liée à cette biomasse herbacée totale, deux autres méthodes d'estimation indirectes ont été utilisées. Elles se basent toutes les deux sur une relation entre la biomasse au pic de végétation et des paramètres pluviométriques (Sinsin, 1993). La première méthode permet une estimation à l'échelle régionale¹⁹ :

$$Y = -10.432 + 0.017 * P \quad (12)$$

Avec Y, la phytomasse maximale en Mg MS/ha, et P, la pluviométrie moyenne annuelle pour la région donnée (mm/an). La seconde méthode permet de tenir compte des conditions locales²⁰ (Sinsin, 1991, cité dans Sinsin 1993) :

$$Y = 10323.63 - 1385.69 * x_a + 14.57 * x_b \quad (13)$$

Avec Y, la phytomasse maximale, en kg MS/ha, x_a , le nombre de mois sans pluie avant la première pluie précoce, et x_b , le cumul des pluies de juillet-août pondéré par le nombre de jours de pluie durant ces deux mois (mm/jour). Les données utilisées ici sont les mesures locales et non plus les moyennes régionales. Dans notre cas, la station pluviométrique de Natitingou a été utilisée (Infoclimat, 2021).

Les valeurs obtenues sont 7.4 et 5.7 Mg MS/ha pour la méthode régionale et locale respectivement.

¹⁹ Probabilité de la régression = 0.98 ; coefficient de corrélation = 0.999

²⁰ Seuil de signification de la régression = 0.07 ; coefficient de détermination = 0.69

5.3.2 Coefficient d'ingestion des fourrages

Dans cette étude, deux faciès principaux sont retenus comme réservoirs de ressources fourragères pour le bétail : les savanes herbeuses, composées majoritairement d'herbacées, avec une faible couverture d'arbres et d'arbustes (moins de 10%, FAO, 2012) ; et les forêts claires. Dans chaque faciès, deux éléments sont susceptibles d'être mangés par le bétail : les feuilles des arbres et arbustes, et la végétation herbacée.

Pour tenir compte de la différence entre la phytomasse totale et la phytomasse ingérée, deux coefficients sont utilisés (Tableau 20). Le coefficient d'appétibilité permet d'estimer la part de phytomasse qui est réellement appétible par les animaux. Il dépend des espèces qui composent la végétation (Agonyissa & Sinsin, 1998; Djaby, 2010). Ce coefficient a été estimé sur base des mesures de Sinsin (1993) pour les herbes et sur base de relevés de terrain pour les feuilles (cf. III.4.3, échantillonnage de la biomasse foliaire). Le coefficient de préservation de la végétation estime la part d'une même plante qui peut être prélevée sans mettre en péril sa capacité à croître et se reproduire (Sinsin, 1993). Il est estimé à 15 – 20 % pour les arbres comestibles pour le bétail (Sinsin, 1993).

Après avoir tenu compte des coefficients d'ingestion, la quantité de phytomasses ingérables par le bétail est convertie en quantité de nutriments sur base des concentrations en N et P mesurées par Djaby (2010, Tableau 20).

Tableau 20 – Coefficients d'ingestion et concentrations en nutriments utilisés pour les différents éléments de végétation.

Type de végétation	Élément	Coefficient d'ingestion				Concentration [g/g MS]		
		Appétibilité	*	Préservation	*	N	P	*
Savane herbeuse	Herbe	0.95	a	1	b	0.01011	0.00076	c
Savane herbeuse	Feuille	0.41	b	0.2	a	0.0339	0.00285	c
Forêt claire	Herbe	0.9	a	1	b	0.01011	0.00076	c
Forêt claire	Feuille	0.28	b	0.2	a	0.0339	0.00285	c

* Source : a = Sinsin, 1993 ; b = sur base des mesures de terrain ; c = Djaby 2010

5.3.3 Coefficient d'excrétion par le bétail

Djaby (2010) a étudié en détail trois terroirs différents de la zone sahéenne du Niger comprenant chacun plus d'une dizaine de troupeaux. Il a estimé que, pour 100 kg de N et P ingérés par un animal, 40 et 87 kg de N et P, respectivement, sont excrétés dans les déjections. Ces deux taux de recyclage des nutriments ont été choisis pour évaluer la quantité de nutriments qui sera excrétée pour une quantité donnée de nutriments ingérés.

5.4 Scénarios de gestion de la fertilité

Après avoir quantifié les flux de nutriments pour chaque spéculation et estimé la quantité de nutriments recyclables par le bétail, trois scénarios de gestion de la fertilité ont pu être analysés. Pour chaque scénario, un bilan complet de nutriments est réalisé pour les spéculations importantes du terroir. Les cultures présentant un déficit de nutriments sont

identifiées. La quantité de nutriments recyclables par le bétail est alors comparée avec le déficit pour déterminer si ce dernier pourrait être comblé en valorisant ce recyclage.

Pour chaque scénario, des hypothèses sur trois flux de nutriments sont émises :

- a) La fertilisation minérale : le flux IN 1, relatif aux intrants chimiques, a été fixé soit à sa valeur mesurée (c'est-à-dire la dose de fertilisants déclarée lors des enquêtes), soit est supposé égale à 0.
- b) L'utilisation des résidus de culture : les résidus peuvent subir une grande diversité de traitements. Ici, on considère soit qu'ils sont laissés sur les champs à 100 %, soit que 90% sont mangés par le bétail.
- c) La restitution des déjections animales sur les cultures : la quantité de nutriments recyclés sur les champs dépend du mode de gestion des troupeaux. Le recyclage peut être de 0 % si les animaux n'ont pas le droit d'accéder aux champs, ou de 100 % si l'on fait l'hypothèse que l'entièreté des déjections sont ramassées et amenées sur les champs. Une hypothèse intermédiaire est de considérer qu'une partie des déjections seulement peut être recyclée grâce au parcage ou à la divagation des animaux dans les champs. Le chiffre de 50 % de recyclage a été retenu.

IV Résultats et discussion

1 Caractérisation du système agricole

1.1 Description de l'échantillon de population

Le Tableau 46 (annexe 7) montre quelques statistiques sur l'échantillon de population interrogée lors des enquêtes sur le terrain. Trente gestionnaires d'exploitations agricoles ont pu être interrogés par village, sauf à Moussasanmou (n=25). Au total, 177 gestionnaires ont été interrogés dans les six villages.

Bien qu'elles effectuent une partie non-négligeable du travail au champ, il n'était pas facile de trouver des femmes gestionnaires d'exploitations (sauf pour Kotopounga). Le niveau d'éducation est faible, une majorité des agriculteurs n'étant pas alphabétisés. Le croisement de la variable sexe avec le niveau d'instruction montre aussi que les femmes sont en général moins instruites que les hommes (Tableau 47, annexe 7). En moyenne, pour l'ensemble des villages, il y a presque autant de jeunes et d'enfants qui travaillent aux champs que d'adultes (respectivement 2.9, 2.4 et 2.6 adultes, jeunes et enfants par ménage travaillant aux champs en moyenne). On a donc bien affaire à une agriculture familiale. De manière générale, peu d'agriculteurs pratiquent uniquement le maraichage dans cette région. Cependant, la proportion d'agriculteurs combinant maraichage et cultures pluviales varie grandement en fonction des villages. Les agriculteurs qui pratiquent les cultures pluviales ont en moyenne 4.4 parcelles et ce nombre varie relativement peu (coefficient de variation = 36 % tout village confondu). Enfin, la majorité des interrogés se disent assez limités dans leur travail car ils ne possèdent qu'un vélo ou une moto pour le transport des récoltes. Dans certains villages, les agriculteurs achètent ou louent des tricycles.

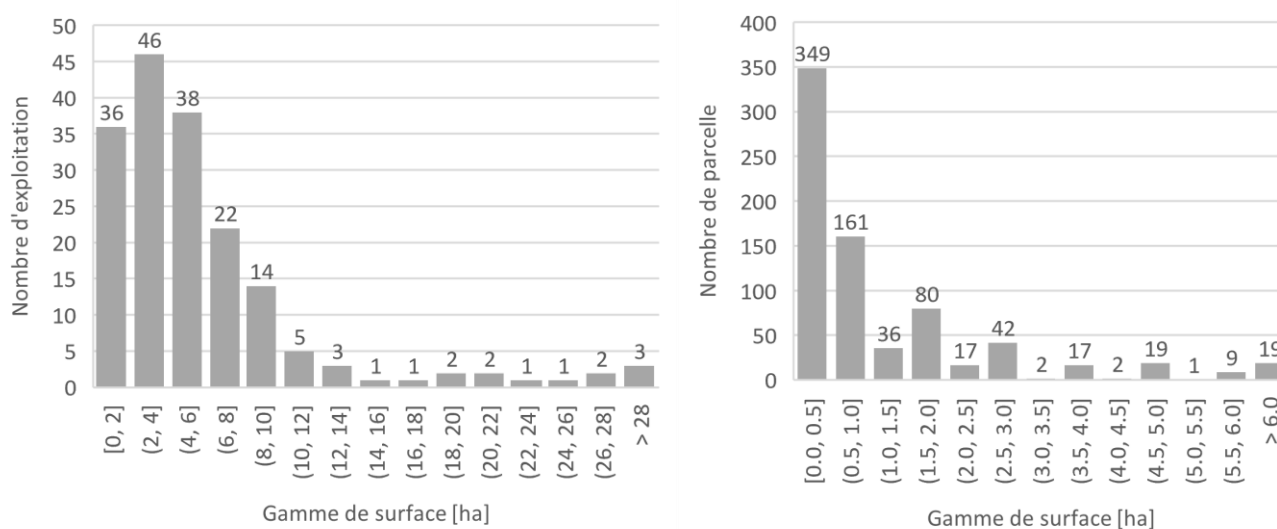


Figure 22 – Distribution de la surface totale des exploitations (gauche) et des surfaces de chaque parcelle (droite). L'abscisse donne la gamme de surface pour chaque bâtonnet (par exemple la gamme 0 à 2 ha = [0, 2]).

1.2 Caractéristiques des exploitations

1.2.1 Taille des exploitations

L'agriculture pratiquée dans la zone d'étude est de relativement petite taille. D'une part, car 88 % des exploitations occupent moins de 10 ha, et d'autre part car 91 % des parcelles font moins de 3 ha (Figure 22). La définition de *smallholder farming* au sens strict (moins de 2 ha) ne s'applique donc pas mais nous avons tout de même affaire à une agriculture « à taille humaine » avec très peu (voir pas) de mécanisation.

1.2.2 Types de sols

Après avoir renommé les types de sols par leur nom commun, les différents villages peuvent être comparés sur ce niveau (Tableau 21). De grandes différences existent en fonction des terroirs. Par exemple, à Gonri, la majorité des cultures se trouvent sur des sols de type « bas-fonds » (bonne rétention d'eau, riche en MO) alors qu'à Sammongou (et dans une moindre mesure à Tonri) une bonne partie des cultures se trouvent sur des sols de type « caillouteux-rouge » (contenant des latérites et un peu de sable). Ces différences sont intéressantes car elles pourraient expliquer en partie des différences de rendements entre villages.

Tableau 21 – Superficie des zones cultivées par type de sol (noms communs) et par village (données d'enquête).
Les sols les plus importants de chaque village sont indiqué en bleu italique.

Type de sol par village	Superficie [ha]						
	GONRI	TONRI	KOTOPOUNGA	MOUSSASANMOU	PESSAGOU	SAMMONGOU	TOTAL
argileux	8	0	0	0	0	0	8
bas-fonds	<i>114</i>	16	0	0	2	6	138
caillouteux-rouge	<i>52</i>	<i>207</i>	<i>27</i>	<i>12</i>	<i>48</i>	<i>180</i>	526
sableux	0	0	3	0	<i>82</i>	0	85
sablo-argileux	0	<i>288</i>	<i>49</i>	<i>20</i>	0	0	357
autre	1	8	9	9	31	0	58
total	<i>175</i>	<i>519</i>	<i>88</i>	<i>41</i>	<i>163</i>	<i>186</i>	<i>1172</i>

1.2.3 Parcelles recensées, spéculations et associations

Les chiffres présentés au Tableau 21 concernent l'ensemble des parcelles des 177 agriculteurs interrogés. Cependant, les informations précises sur les pratiques de fertilisation et les spéculations de toutes ces parcelles n'ont pas été encodées. Seules les trois plus grandes parcelles de chaque agriculteur ont été recensées en détails. Dans les faits, nous disposons d'informations détaillées pour moins que les trois plus grandes parcelles de chaque agriculteur car il y a eu des oublis ou des erreurs d'encodage. Le Tableau 22 illustre les différences entre la surface totale des parcelles des interrogés et les parcelles avec des informations précises. Les différences plus faibles pour les villages de Gonri, Tonri et Moussasanmou témoignent que notre échantillonnage est plus représentatif de l'ensemble des parcelles pour ces trois villages.

Tableau 22 – Différence entre la surface totale cultivée par les 177 interrogés et la surface des cultures pour lesquelles nous disposons d'informations détaillées (fertilisation, rendements, etc.).

Village	Toute parcelles [ha]	Parcelles avec détails [ha]	Différence	
GONRI	174	146	29	16%
KOTOPOUNGA	88	68	21	23%
MOUSSASANMOU	42	35	7	16%
PESSAGOU	164	37	127	77%
SAMMONGOU	186	40	146	79%
TONRI	519	469	50	10%
TOTAL	1174	794	380	32%

Les 794 ha de cultures pour lesquelles nous disposons d'informations précises sont composées en grande partie de maïs et de soja (36 et 34 % respectivement pour l'ensemble des villages, Tableau 23). Le coton est la troisième culture la plus importante de la zone d'étude. Il occupe 12% de l'ensemble des surfaces étudiées ; cependant, il n'est cultivé qu'à Gonri et à Tonri. A l'inverse, le maïs et le soja sont des cultures bien présentes dans tous les villages (à une exception près, le maïs à Pessagou). Les autres cultures occupent un faible pourcentage de la surface globale, et leur importance relative varie fortement d'un village à l'autre. La surface occupée par ces cultures est certainement sous-estimée puisqu'elles se retrouvaient rarement dans les trois plus grandes parcelles de chaque agriculteur et elles n'étaient donc pas encodées.

Tableau 23 – Superficie (ha) et pourcentage de surface par spéculation et par village selon les enquêtes. Les trois (ou quatre) spéculations les plus importantes de chaque village sont indiquées en bleu italique.

Spéculation	GONRI		TONRI		KOTOPOUNGA		MOUSSASANMOU		PESSAGOU		SAMMONGOU		Total	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Maïs	<i>49.6</i>	<i>34</i>	<i>194.3</i>	<i>41</i>	<i>25.8</i>	<i>38</i>	<i>13.8</i>	<i>40</i>	0.0	0	<i>5.5</i>	<i>14</i>	289	36
Soja	<i>73.0</i>	<i>50</i>	<i>160.0</i>	<i>34</i>	<i>7.2</i>	<i>11</i>	<i>8.9</i>	<i>25</i>	<i>17.5</i>	<i>47</i>	5.0	13	272	34
Coton	<i>6.0</i>	<i>4</i>	<i>93.0</i>	<i>20</i>	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	99	12
Sorgho R.	1.3	1	7.9	2	<i>8.8</i>	<i>13</i>	<i>7.4</i>	<i>21</i>	1.5	4	0.0	0	27	3
Arachide	1.0	1	0.5	0	3.8	6	0.0	0	<i>3.5</i>	<i>9</i>	<i>9.3</i>	<i>23</i>	18	2
Niébé	1.3	1	4.3	1	2.1	3	0.8	2	<i>3.6</i>	<i>10</i>	<i>5.5</i>	<i>14</i>	17	2
Riz	9.3	6	5.0	1	1.8	3	0.0	0	0.0	0	0.5	1	17	2
Petit mil	0.5	0	0.0	0	7.7	11	0.1	0	<i>5.2</i>	<i>14</i>	0.0	0	13	2
Sésame	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	2.0	5	<i>5.7</i>	<i>14</i>	8	1
Voandzou	0.0	0	0.0	0	2.3	3	1.1	3	2.5	7	1.5	4	7	1
Igname	0.4	0	0.0	0	4.5	7	0.8	2	0.0	0	0.0	0	6	1
Anacarde	2.5	2	2.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.8	2	5	1
Lentille	1.1	1	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.6	2	3.5	9	5	1
Manioc	0.0	0	0.0	0	4.1	6	0.5	1	0.0	0	0.0	0	5	1
Sorgho B.	0.0	0	2.0	0	0.0	0	1.0	3	0.3	1	0.8	2	4	1
Pois d'ang.	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.6	2	1.5	4	2	0
Autre	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.6	2	0.0	0	0.0	0	1	0
Fonio	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.3	1	0.3	0
Total	146	100	469	100	68	100	35	100	37	100	40	100	794	100

Pois d'ang. : pois d'angole ; R. : rouge ; B. : blanc.

Tableau 24 – Pourcentage des surfaces en culture associée par village (selon les enquêtes).

Village	Superficie [ha]		
	Total	Associé	%
GONRI	145.7	0.5	0.3
KOTOPOUNGA	67.9	23.5	34.6
MOUSSASANMOU	35	18.7	53.6
PESSAGOU	37.2	30.2	81.3
SAMMONGOU	39.7	23.5	59.2
TONRI	468.9	0	0
TOTAL	794.4	96.5	12.1

Parmi les 794 ha de cultures, 12 % des surfaces sont occupées par des associations de cultures (Tableau 24). Le pourcentage des surfaces en cultures associées est très variable d'un village à l'autre. Certains villages tels que Gonri et Tonri pratiquent près de 100 % de culture non associées alors qu'à Pessagou 81 % des surfaces sont associées.

On distingue deux types d'associations. D'une part, comme dans les villages de Kotopounga et Moussasanmou, les associations de céréales comme le maïs avec du sorgho ou du mil. D'autre part, comme dans les villages de Pessagou et Sammongou, les associations de légumineuses (soja, arachide, lentille, etc.) avec d'autres spéculations (Tableau 50, annexe 7).

1.3 Pratique de fertilisation

1.3.1 Surface fertilisée

La surface fertilisée dépend du type d'engrais considéré (urée, NPK ou amendement organique) et de la spéculation donnée (Tableau 25). En termes de fertilisation minérale, les parcelles de coton sont les plus fertilisées, suivies des parcelles de maïs. L'apport de manière active (sans compter le parage et la divagation animale) de matière organique sur les parcelles est beaucoup moins fréquent. Les 10 et 13 % des surfaces fertilisées pour le petit mil et le sorgho (respectivement) correspondent en fait à quelques parcelles appartenant à des peuhls qui récoltent manuellement les excréments de leurs troupeaux.

Le pourcentage des surfaces fertilisées dépend aussi du village (annexe 7.3). Pour l'application de NPK, les coefficients de variation entre les villages (par spéculation) sont toujours supérieurs à 87 %. Les seules exceptions sont le coton et le manioc, où le coefficient est nul, et le maïs, où le coefficient vaut 24 % (indiquant une plus faible variation entre les villages).

Globalement, notre échantillonnage montre que 346 ha de cultures sont fertilisés chimiquement. Si l'on rapporte cette surface à l'ensemble des parcelles pour lesquelles nous disposons d'informations détaillées (794 ha), le pourcentage de surfaces fertilisée est de 44 %. Cependant, il est très peu probable que les agriculteurs fertilisent leurs parcelles les moins importantes (pour lesquelles nous n'avons pas les informations détaillées). Il conviendrait donc de rapporter ce chiffre à la surface totale cultivée par les 177 répondants (1174 ha), on

Tableau 25 – Pourcentage des surfaces de chaque spéculatation recevant un apport de NPK, d'urée ou d'amendements organiques (pour l'ensemble des villages et sur base des données déclaratives).

Spéculatation	Toutes les parcelles		NPK		Urée		Orga.	
	N	ha	ha	%	ha	%	ha	%
Coton	13	54.0	54.0	100.0	54.0	100.0	0.0	0.0
Maïs	110	258.9	217.9	84.2	202.4	78.0	23.1	9.0
Arachide	20	18.1	12.9	71.5	5.5	30.0	2.3	12.0
Lentille	7	5.2	3.6	69.0	3.6	69.0	0.0	0.0
Voandzou	15	7.4	3.7	50.2	3.7	50.0	0.0	0.0
Niébé	26	17.4	7.8	44.8	1.0	6.0	0.3	2.0
Sorgho R-B	41	30.8	8.4	27.4	1.5	5.0	4.1	13.0
Igname	10	5.6	1.5	26.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Riz	14	16.5	4.0	24.0	3.8	23.0	0.0	0.0
Petit mil	16	13.5	2.3	17.3	0.0	0.0	1.4	10.0
Soja	100	231.5	29.5	12.7	23.5	10.0	7.5	3.0
Manioc	10	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	tot.	tot.	tot.	μ	tot.	μ	tot.	μ
Tout confondu	382	664	346	44	299	31	39	4

Tot. = total, μ = moyenne, % = pourcentage de la superficie de toutes les parcelles (ha), N = nombre.

obtient alors le chiffre de 29 %. Cela montre que les pourcentages de surfaces fertilisées des tableaux ci-dessus sont probablement aussi surestimés.

1.3.2 Doses appliquées

Les doses moyennes d'azote appliquées par fertilisation minérale diffèrent d'une culture à l'autre (Fval=2.98, Pval=0.02, Figure 24) contrairement aux doses de phosphore qui varient relativement peu (Fval=1.76, Pval=0.14). Les moyennes estimées pour le soja, riz, maïs, coton et voandzou tous villages confondus sont respectivement 20.6, 23.5, 49.5, 54.4 et 71.0 kg/ha pour l'azote, et 5.6, 7.6, 18.3, 16.7, et 12.7 kg/ha pour le phosphore.

Les différences entre les villages ont été évaluées pour le maïs. Seul le village de Moussasanmou a une moyenne d'application d'azote minéral supérieure aux autres villages (Fval=25, Pval<10⁻⁴, Figure 27). Il en est de même pour l'application de phosphore (Fval=16, Pval<10⁻⁴). Cette différence pour Moussasanmou pourrait être expliquée par des facteurs environnementaux (type de sol, etc.) ou sociaux (d'autres connaissances, plus de moyens, etc.) propres à ce village.

Pour du soja en zone soudano-guinéenne, les recommandations de fertilisation sont de l'ordre de 15 et 23 kg/ha de N et P selon Chabi et al. (2021). Pour le maïs elles sont de 76 et 13 kg/ha de N et P (selon le Système national de recherche agricole du Bénin, cité dans Tovihoudji et al, 2018), mais les doses observées chez les agriculteurs se rapprochent plutôt de la moitié de la recommandation selon Kormawa et al. (2003). Selon Honfoga (2018), la dose recommandée pour le coton par défaut²¹ au Bénin est de 51 et 15 kg/ha de N et P. Cependant, Honfoga (2018) estime que cette dose devrait être réduite de 10 à 60 % en fonction de l'état

²¹ Dose « pan-territoriale » de 200kg/ha dont 150kg NPK 14-23-14 et 50 kg d'urée.

du sol pour assurer la durabilité du système. Les valeurs observées pour le coton correspondent parfaitement aux recommandations par défaut. En revanche, la correspondance est moins forte pour le soja et le maïs, bien que l'ordre de grandeur soit similaire.

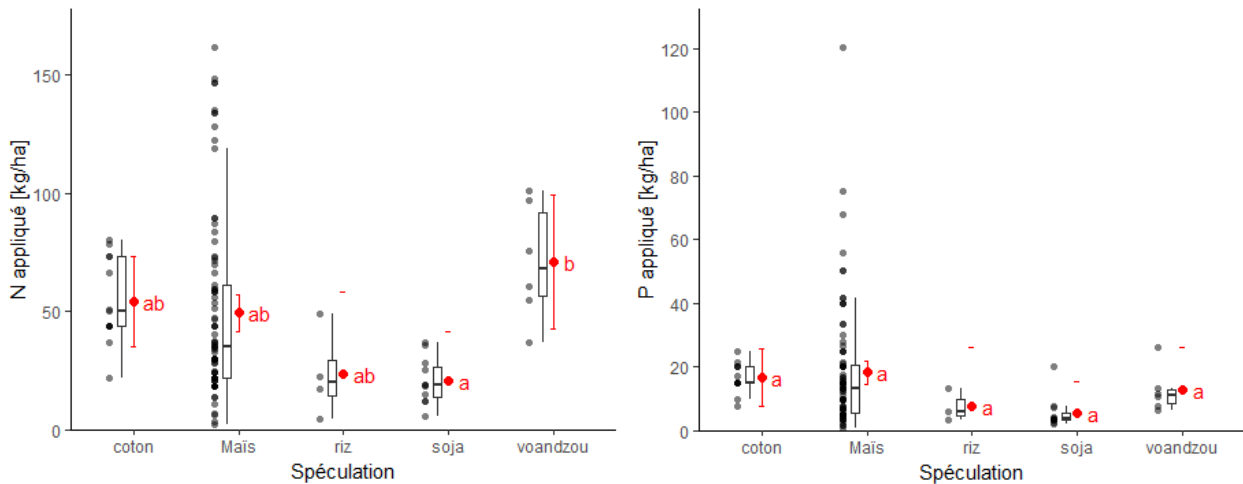


Figure 23 – Dose de N (gauche) et P (droite) appliquée via la fertilisation minérale (kg/ha)²².

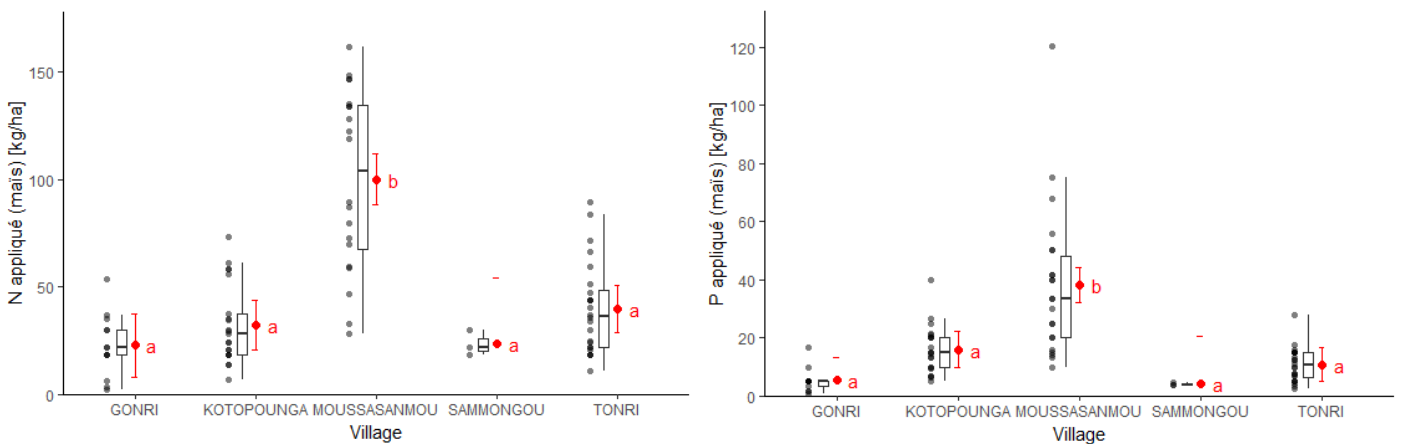


Figure 24 – Dose de N (gauche) et P (droite) appliquée via la fertilisation minérale pour le maïs uniquement et pour chaque village (kg/ha)²². Aucun maïs n'était fertilisé dans notre échantillon à Sammongou.

Au vu du faible apport manuel d'amendements organiques recensé, aucune moyenne représentative n'a pu être calculée à part pour l'apport de compost sur du maïs (N=9). La moyenne calculée est de 92 kg compost/ha, ce qui représente un apport d'azote et de phosphore de 0.9 et 0.2 kg/ha respectivement (si on considère un taux de matière sèche moyen de 45 % et une concentration moyenne en N et P de 2.2 et 0.4 % respectivement – Vlaming & Heesmans, 2019). Le taux recommandé par le Système national de recherche agricole du Bénin est de 6 Mg de fumier (Tovihoudji et al., 2018).

²² Les points noirs représentent les données brutes. Les points rouges et les barres d'erreur représentent les moyennes (marginales estimées) ± intervalle de confiance à 95 % par groupe. Les moyennes ne partageant pas la même lettre sont significativement différentes par le test de Tukey au niveau de confiance de 5 %.

1.4 Gestion des résidus de culture

L'analyse des utilisations des résidus de cultures par les agriculteurs montre qu'à l'heure actuelle, une partie des résidus est toujours brûlée. Cette fraction varie en fonction des types de résidus mais elle ne passe jamais sous les 22 % (sauf pour les feuilles de céréales, 8%). Les résidus les plus brûlés sont les tiges de coton, les tiges de légumineuses et les

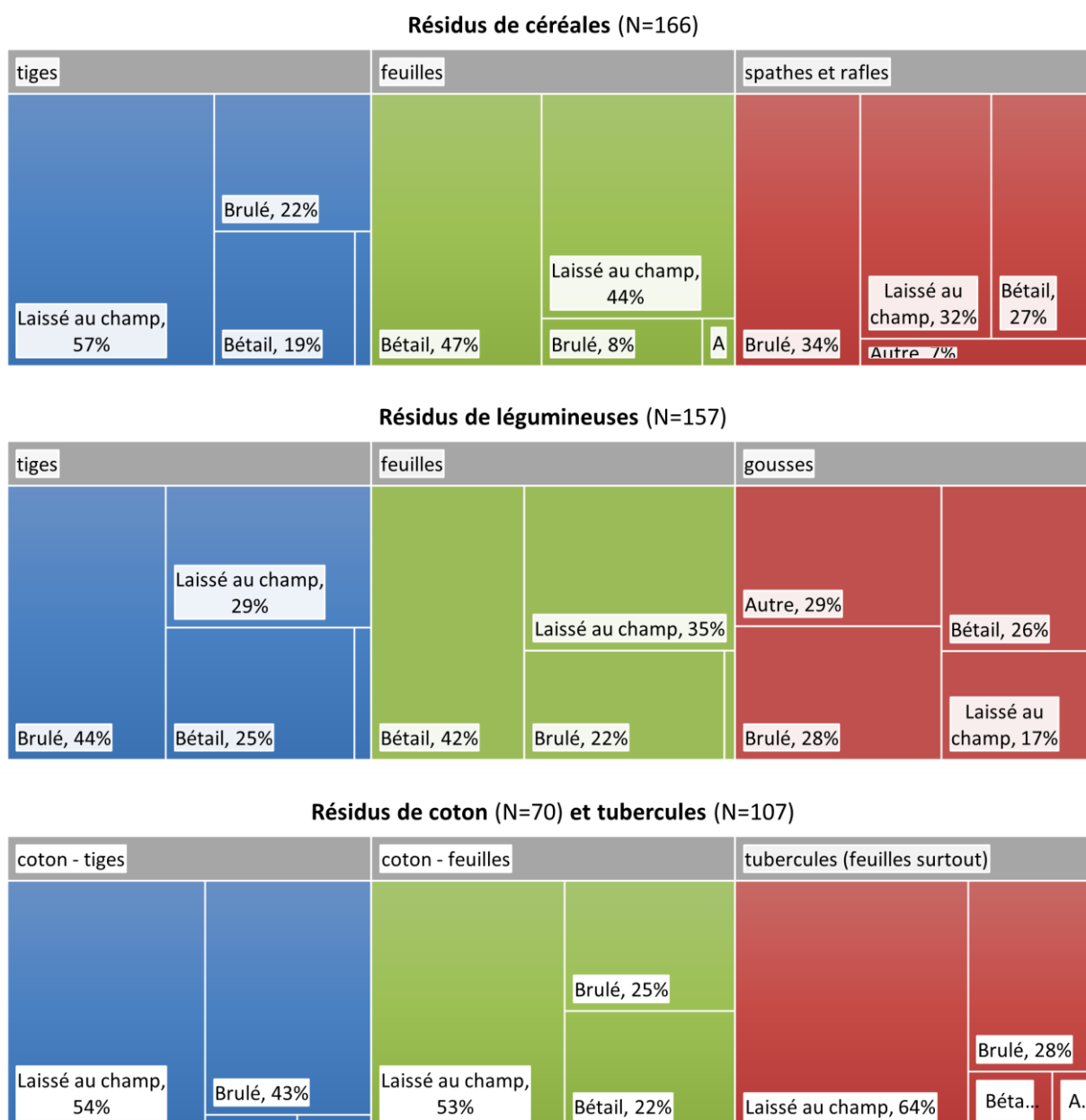


Figure 25 – Pourcentage de chaque type de résidus dédié à chaque utilisation. La catégorie « Autre », souvent peu visible, reprend à la fois l'alimentation humaine, le dépôt en dehors du champ, le compostage, ou d'autres utilisations non-répertoriées. N = nombre de répondants pour chaque type de cultures.

spathes-rafles²³ de maïs (43, 44 et 34 % respectivement). Cette pratique n'est pas complètement néfaste puisqu'elle permet de récupérer des minéraux rapidement et limite l'acidification des sols. En revanche, 95 % de l'azote est perdu lorsque les résidus sont brûlés (N'Dri et al., 2018).

La quantité de résidus valorisés par le bétail ne dépasse jamais les 50 %. En général, les agriculteurs n'aiment pas que le bétail pénètre dans leurs champs pour brouter, sous prétexte qu'il piétine trop le sol.

La partie « autre » des gousses de légumineuses correspond à 28 % des résidus qui sont déversés en dehors du champ.

1.5 Discussion sur les caractéristiques du système agricole

La principale limite de cette analyse, basée sur les enquêtes, est la taille de l'échantillon de population. Le nombre total de fermes étant inconnu, il est difficile d'évaluer la représentativité des données recueillies.

De manière générale, cette première analyse confirme que nous avons à faire une agriculture de relativement petite taille avec peu d'intrants. L'apport d'amendements organiques (manuellement) sur les cultures pluviales est quasi nulle. L'apport de fertilisants minéraux, en revanche, est un peu plus important mais se limite souvent à la culture la plus importante de chaque agriculteur (souvent le maïs ou le coton). L'investissement dans les fertilisants est permis par la vente des productions de ces cultures (Roy et al., 2003, cité dans Bielders, 2015). Les doses appliquées sont du même ordre de grandeur que les recommandations, mais le pourcentage de surfaces effectivement fertilisées reste très variable.

Le manque de moyens de transport est souvent cité par les agriculteurs comme un frein pour transporter de la matière organique au champ. La faible disponibilité en MO est aussi un problème pour beaucoup. Notamment à cause du manque de moyens pour acheter des animaux, du manque de connaissances ou de moyens pour soigner les animaux en cas d'épidémie, ou du manque de connaissances pour réaliser son propre compost à partir de divers déchets (sauf dans certains villages où des « formations composts » ont eu lieu). Pourtant, une part non-négligeable des résidus de culture n'est pas valorisée (car brûlée ou jetée en dehors des champs). Plusieurs études ont pourtant montré la plus-value de l'enfouissement des résidus (Akondé & Igué, 2013; J. Djenontin et al., 2011).

Cette analyse montre aussi qu'il y a des différences importantes de certaines pratiques culturales. De plus, les villages qui sont les plus proches géographiquement (cf. Figure 8) sont

²³ Les termes spathes et rafles étaient rassemblés en une seule question dans le questionnaire donc la distinction n'est pas faisable dans les chiffres. Cependant, dans la grande majorité des cas, les spathes sont laissées aux champs ou mangées et les rafles sont brûlées et leurs cendres sont épandues sur les champs.

aussi ceux qui possèdent le plus de similitudes. Par exemple, les villages de Gonri et Tonri, Kotopounga et Moussasanmou, ainsi que Pessagou et Samongou, ont des similitudes deux à deux dans les pratiques d'associations (Tableau 50) et les spéculations les plus importantes du village (Tableau 23). Par manque de temps, l'analyse de la gestion des résidus n'a pas été réalisée par village, mais cela pourrait être intéressant pour voir si des différences entre villages existent aussi à ce niveau-là. Dans la suite, les résultats de la cartographie du terroir (IV2) et les bilans de nutriments (IV4) se concentreront sur le village de Gonri. Ces résultats ne sont donc pas généralisables en tous points aux autres villages.

2 Cartographie de l'occupation du sol

En premier lieu, les résultats des comparaisons des méthodes de pansharpening et des masques de nuages seront présentés. Les classifications en une étape, puis les classifications hiérarchiques, seront ensuite évaluées. Finalement, une cartographie finale sera présentée et les résultats seront discutés.

2.1 *Pansharpening*

La Figure 27 montre le résultat du processus de *pansharpening*. On observe que la résolution spatiale augmente grâce à l'utilisation de la bande PAN. Les deux méthodes donnent cependant des résultats visuellement et quantitativement différents. Visuellement, la méthode Bayésienne conserve bien les couleurs de l'image MS, tandis que la méthode IHS provoque une distorsion de couleurs bien visible mais possède une meilleure résolution spatiale. Quantitativement, l'analyse de l'écart type des valeurs de réflectance des bandes permet de savoir si la gamme de valeurs de réflectance a changé. La Figure 26 montre que la méthode Bayésienne conserve bien la gamme de valeurs de réflectance originale, tandis que la méthode IHS élargit cette gamme, et crée probablement du bruit. Pour nous conforter dans notre choix de méthode, une classification a été réalisée avec la méthode IHS, et l'exactitude s'est révélée significativement plus faible qu'avec la méthode bayésienne.

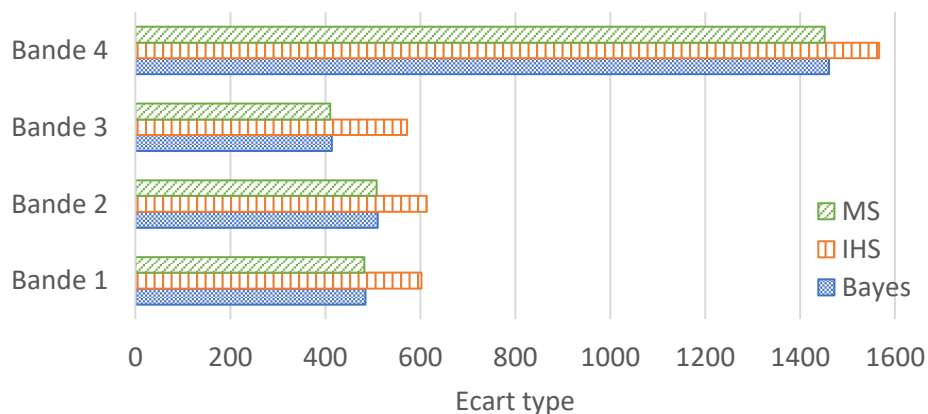


Figure 26 – Comparaison de l'écart type des valeurs de réflectance, par bande et par méthode de pansharpening.

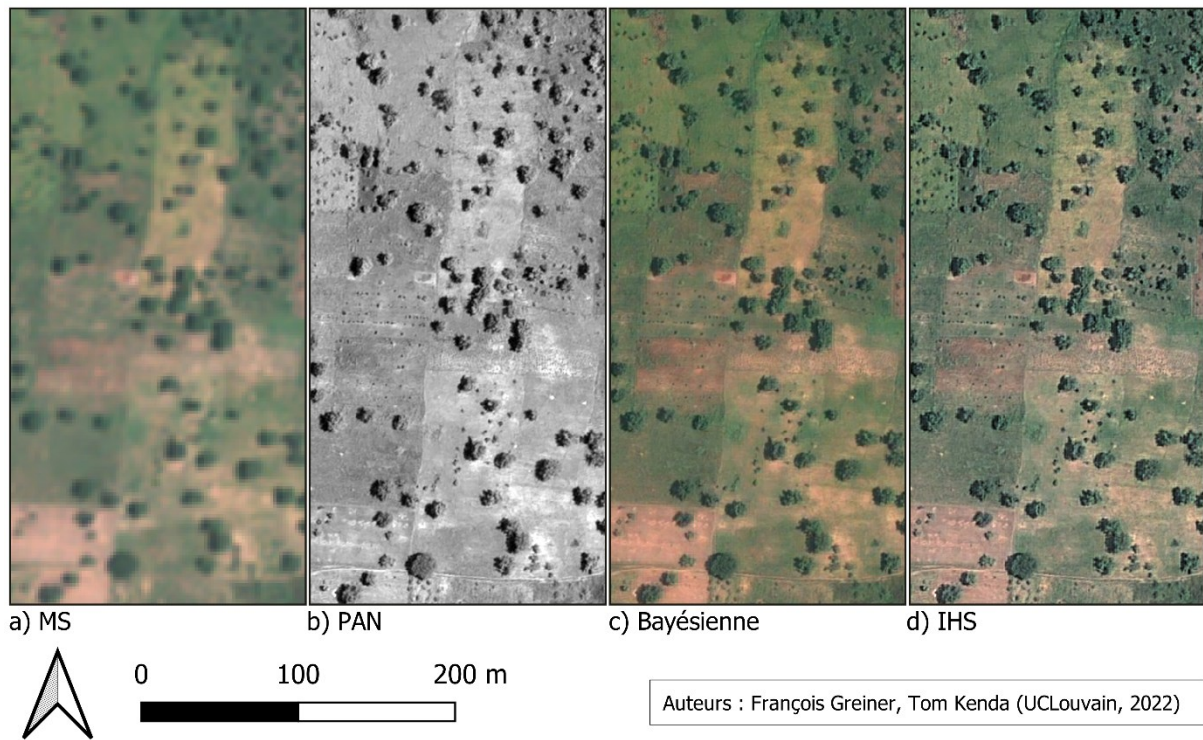


Figure 27 – Comparaison des résultats du pansharpening, selon la méthode Bayésienne ou IHS, à partir des images multi-spectrales (MS) et panchromatiques (PAN)

2.2 Masque de nuages

La Figure 28 compare les trois masques différents. Le masque fourni par Airbus n’est pas satisfaisant. Il ne masque que les nuages de grande superficie, et omet les nuages et les voiles nuageux. Le masque obtenu avec l’algorithme RF, avant application du filtre, détecte tous les

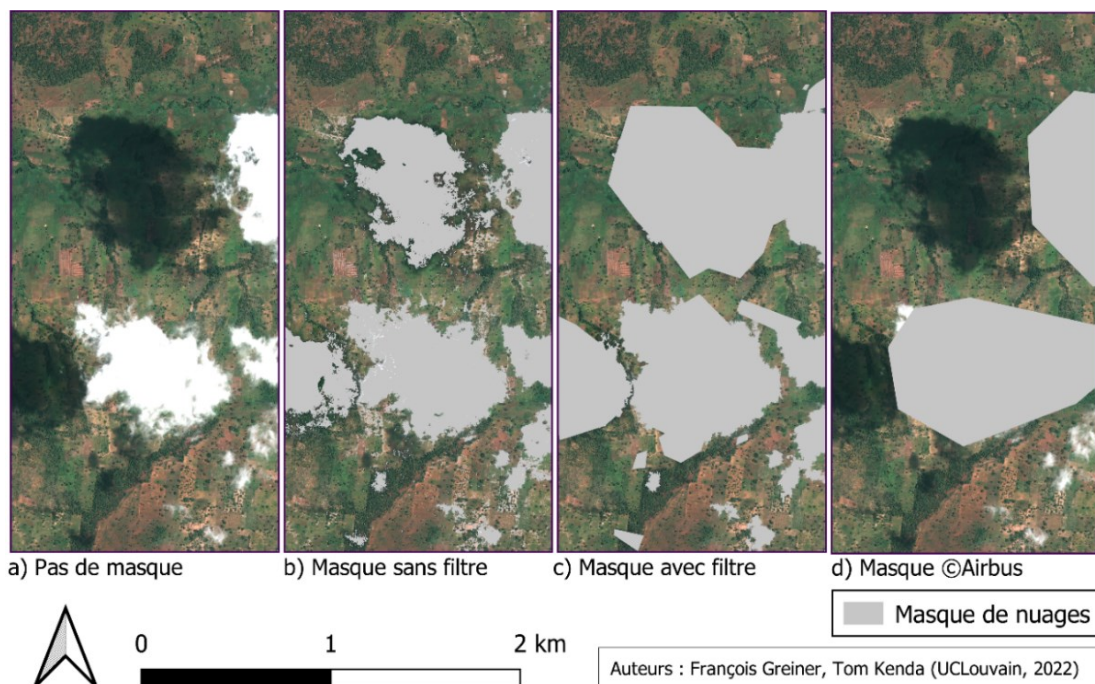


Figure 28 – Comparaison des masques de nuages. c) montre le masque final après application du filtre « sieve ».

nuages²⁴. Cependant, il présente un effet poivre et sel, avec notamment certains pixels de sol nu classifiés en tant que nuage. Le masque final, après l'application du filtre de type « sieve » et la réalisation de corrections manuelles, ne présente plus d'erreur d'omission apparente. Les contours linéaires montrent que les corrections manuelles ont été faites de manière grossière.

L'analyse des indicateurs quantitatifs permet de confirmer ces observations. Le masque fourni par Airbus possède une exactitude d'utilisateur moyenne (0.67), car il omet de nombreux nuages. Il a cependant une exactitude de producteur maximale, car tous les pixels de validation classés comme nuages sont effectivement des nuages. Cette exactitude est en réalité exagérée si on observe la Figure 28, mais ceci n'a pas été mis en évidence par les ROI de validation, trop peu nombreux à ces endroits. Le masque sans filtre a une exactitude de producteur plus faible (0.87), car certaines surfaces sont classifiées comme des nuages par erreur. Son exactitude d'utilisateur est par contre de 0.98, car presque tous les nuages sont détectés. Le masque final avec filtre a une exactitude presque maximale (1 et 0.99). Ce résultat doit néanmoins être nuancé, car les corrections manuelles, certes peu nombreuses, mais grossières, ont à tort classifié comme nuages certaines surfaces. Cela aurait dû mener à une exactitude de producteur plus faible, mais ceci n'a à nouveau pas été mis en évidence par les ROI de validation, trop peu nombreux à ces endroits.

Tableau 26 – Résumé de l'exactitude de l'utilisateur, l'exactitude du producteur et du F-score des masques de nuage.

	Classe 1 : Nuages		
	PA	UA	F-score
Masque ©Airbus	1	0.67	0.8
Masque sans filtre	0.87	0.98	0.92
Masque avec filtre	1	0.99	0.99

Les mêmes méthodes de *pansharpening* et de masque de nuages pourront être utilisées pour les autres villages de la zone d'étude. Il faudra cependant veiller à ce que la période d'acquisition n'influe pas sur les bons résultats de ces méthodes.

2.3 Evaluation des classifications en une étape

Les différentes classifications en une étape (17 classes) donnent des résultats mitigés. L'exactitude globale est toujours comprise entre 45 et 49 % (Tableau 27). L'ajout de features ne permet pas d'améliorer l'exactitude ; aucun des datasets a une exactitude significativement plus élevée.

²⁴ L'utilisation du mot « nuages » inclut pour la suite les ombres de nuages et les voiles nuageux.

Tableau 27 - Exactitude globale des classifications en une étape pour chaque dataset.

Dataset N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
OA (%)	47	45	48	48	49	46	46	49	49

Une analyse plus détaillée permet cependant de constater que le *dataset* 9 possède de meilleures exactitudes pour les classes de cultures (1-7), et il sera donc choisi comme référence. L'analyse de sa matrice de confusion permet de comprendre où se situent les erreurs (Tableau 28) :

1. Aucun pixel n'a été classé comme du coton vert, et le riz n'a jamais été classé correctement. Ils ont principalement été confondus avec le soja vert, le maïs vert et la végétation herbacée.
2. Les cultures les mieux prédites (> 0.5) sont le soja vert, le maïs sénéscent et le coton sénéscent.
3. La classe de végétation herbacée est fort contaminée par les cultures, en plus des arbustes et arbres.
4. La végétation herbacée, les arbustes et les arbres se confondent les uns aux autres.
5. Les classes 11 à 17 possèdent une bonne exactitude (> 0.88), à l'exception de la confusion entre les trois types de sols nus. Les sols nus agricoles sont trop souvent prédits, ce qui signifie qu'ils ont probablement été surentraînés.

Tableau 28 - Matrice de confusion pour la classification en une étape du dataset N°9. Les cellules qui sont dans les 15 % des valeurs les plus élevées sont colorées en rouge. Les cellules avec les pixels correctement prédits sont encadrées. v = vert, s = sénéscent, a = agricole, c = de type cuirasse, au = autre. « Herbe » correspond à la végétation herbacée.

Matrice de confusion		Prédit																	UA
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Référence	Soja v - 1	13290	17	3901	51	0	81	0	2327	260	9	0	0	0	0	0	0	0	0,67
	Soja s - 2	1952	145	4	1045	0	98	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04
	Maïs v - 3	8315	0	6102	0	0	150	28	1649	419	16	0	0	0	0	0	0	0	0,37
	Maïs s - 4	1185	780	413	3804	0	380	0	744	0	0	0	0	257	0	0	0	0	0,50
	Coton v - 5	233	0	996	0	0	3	0	466	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0,00
	Coton s - 6	3	10	450	131	0	1598	0	1192	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,47
	Riz - 7	1129	0	1183	0	0	0	0	696	0	55	0	0	0	0	0	0	0	0,00
	Herbe - 8	872	33	1015	23	0	263	0	3956	3804	212	0	0	0	0	0	0	0	0,39
	Arbuste - 9	11	0	252	0	0	14	0	1491	1019	1387	0	0	0	0	0	0	0	0,24
	Arbre - 10	114	0	238	3	0	8	0	1266	457	3105	0	0	15	0	0	0	0	0,60
	Ombre - 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	357	41	1	0	0	0	0	0,78
	Sol nu a - 12	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	4271	0	2048	0	0	0	0,67
	Sol nu c - 13	0	0	0	91	0	0	0	0	0	0	0	2485	2681	205	0	0	0	0,49
	Sol nu au - 14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1593	0	5287	0	0	0	0,77
	Eau - 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	924	0	0	0,91
	Bâti 1 - 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	735	0	0,99
	Bâti 2 - 17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	9	0	0	0	343	0,96
PA	0,49	0,15	0,42	0,73	/	0,62	0,00	0,29	0,17	0,64	1,00	0,51	0,90	0,69	1,00	1,00	1,00	0,96	
F-score	0,57	0,07	0,39	0,60	/	0,53	/	0,33	0,20	0,62	0,88	0,58	0,64	0,73	0,95	0,99	0,98	0,98	

La fiabilité de la matrice de confusion et des métriques qui en découlent doit cependant être discutée en fonction du nombre de pixels et de polygones de validation. Il y a au total 808 polygones et près de 100.000 pixels de validation. Chaque classe contient au minimum 450 pixels et 5 polygones de validation, à l'exception de la dernière classe qui est peu importante (bâti 2). Dans ce scénario à 17 classes, certaines classes doivent donc être interprétées avec précaution (en particulier les classes 2, 5, 6, 7, 15 et 16, qui contiennent 5 à 6 polygones et peu de pixels de validation) (Annexe 6).

L'erreur la plus importante, qui est l'exactitude nulle pour le coton vert et le riz, s'explique par les conditions de terrain (Figure 29). Ces deux types de cultures sont moins fréquentes que le soja et le maïs. Les champs de coton sont de relativement de grande taille (> 1 ha), mais possédaient une signature spectrale fort hétérogène sur l'image prise le 14 octobre 2021, rendant la création de ROI compliquée. Le riz à Gonri est cultivé sur des champs de petite taille, parfois en association avec des bananiers ou du maïs, et sur des sols de bas-fonds humides qui peuvent rapidement se retrouver envahis par les adventices. Ces particularités ont rendu la création de ROI pour le riz particulièrement délicate. D'autres explications seront discutées dans la section 2.6.

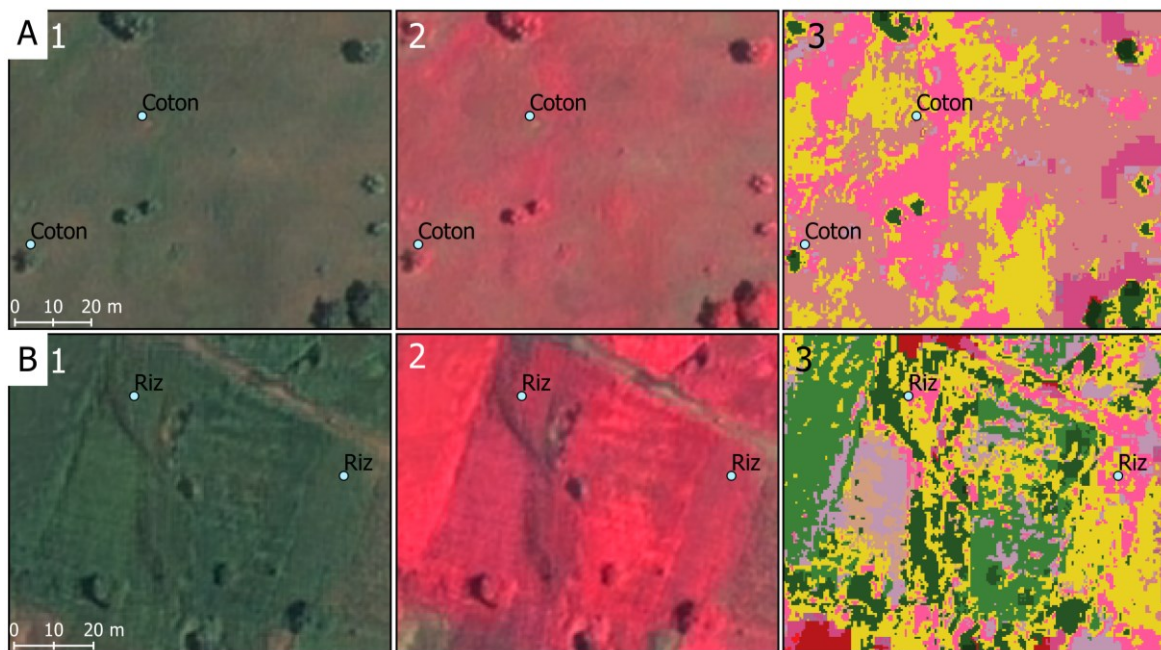


Figure 29 – Zoom sur des champs de A) coton et de B) riz. 1) Image pansharpened en composition colorée 3-2-1 ; 2) Image en composition colorée 4-1-2 ; 3) Classification à 17 classes, selon le dataset 9. Pour la légende, le lecteur est prié de consulter la figure suivante.

La Figure 30 permet d'analyser visuellement la classification. Le zoom A montre qu'une partie du champ de soja vert est correctement classifiée. Cependant, une partie du champ un peu moins verte est classée comme maïs vert et il y a une confusion entre plusieurs classes aux bords du champ. La carte du degré de confiance montre d'ailleurs que les arbres de décision du modèle RF n'ont pas voté à la majorité absolue à ces endroits (< 0.5). Le zoom B montre un champ de maïs sénéscent correctement classifié. Cependant, la partie du champ

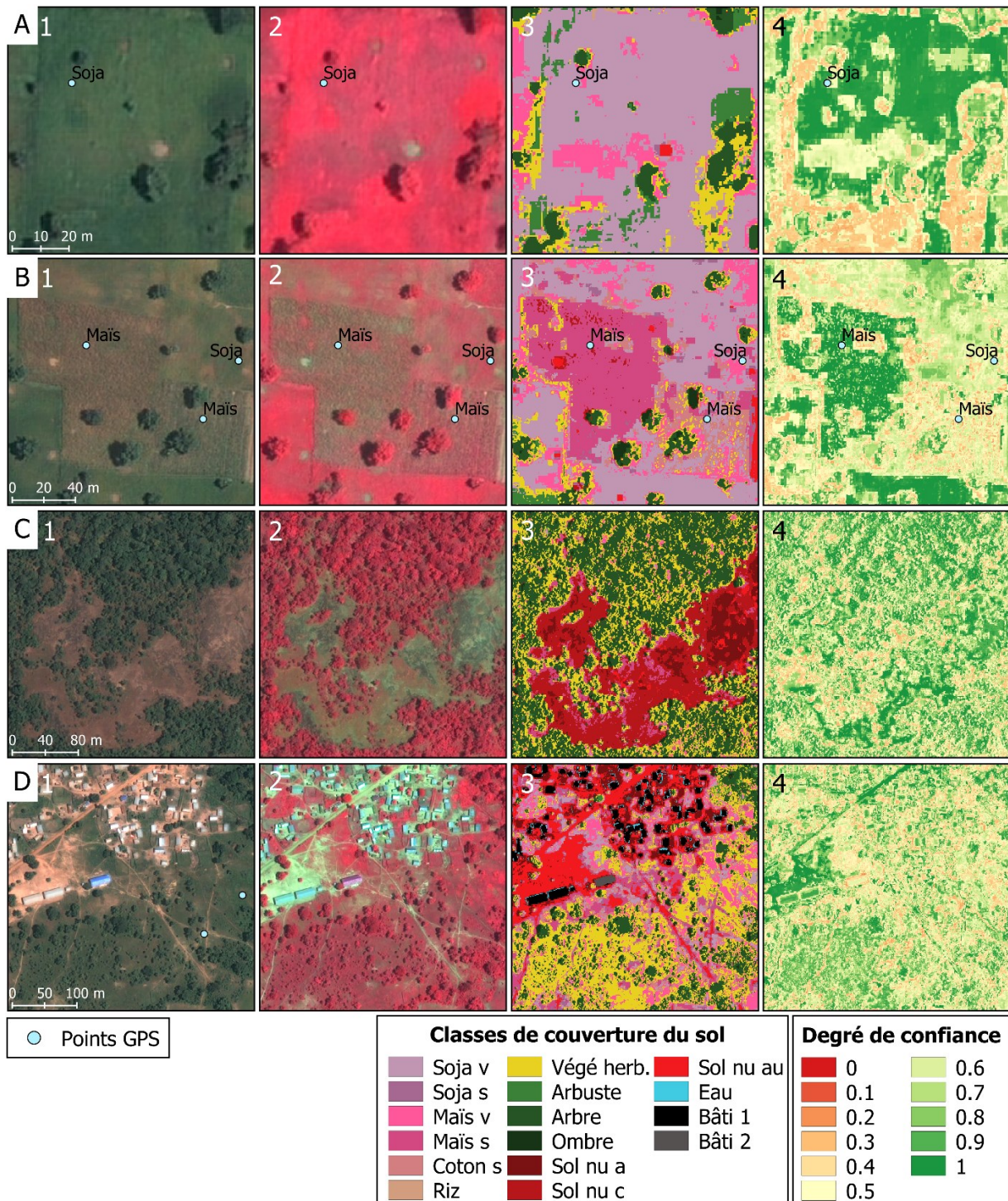


Figure 30 – Zoom sur quelques zones caractéristiques. **A)** Un champ de soja vert **B)** Des champs de maïs sénescent et vert et un champ de soja vert **C)** Une zone forestière avec au centre une clairière avec du sol nu **D)** Zone de savane à côté des habitations. **1)** Image en composition colorée 3-2-1 ; **2)** Image en composition colorée 4-1-2 ; **3)** Classification à 17 classes, selon le dataset 9 ; **4)** Carte du degré de confiance de la classification. v = vert, s = sénescent, végé herb. = végétation herbacée, a = agricole, c = de type cuirasse, au = autre.

en bas à droite n'est pas clairement verte ou sénescente, et est alors classée dans plusieurs autres classes de cultures erronées. Le degré de confiance pour cette partie de champ est d'ailleurs faible (< 0.5). Le zoom C montre que les espaces entre les arbres d'une forêt sont classés comme de la végétation herbacée. C'est en partie correct, mais la classe arbustive

n'apparaît presque pas car elle est remplacée par la végétation herbacée. La confusion entre ces deux classes a cependant peu d'importance pour l'objectif final de cette classification. Le sol nu de type cuirasse de la clairière est en majorité correctement classé. Le dernier zoom montre une zone de savane bien classée. Les toits des habitations sont correctement classés, à l'exception des bordures qui sont souvent classées comme de l'eau, mais ceci n'est cependant pas non plus important pour l'objectif final. Finalement, les routes et les sols nus autour des habitations sont correctement classés comme sol nu « autre », mis à part une confusion minoritaire avec les sols nus agricoles.

L'analyse de la classification et de la matrice de confusion permet donc de voir entre quelles classes il y a de la confusion. La matrice de confusion permet de mieux quantifier les erreurs, tandis que la classification et la carte du degré de confiance permettent de voir la localisation des erreurs. On constate que les erreurs se trouvent principalement dans les zones de transition entre les classes : aux bords des champs, des arbres, des routes, des maisons, etc.

La confusion a lieu entre les classes similaires. Le regroupement des classes similaires permet donc d'augmenter l'exactitude. Logiquement, on constate qu'au moins il y a de classes, au plus l'exactitude est grande. Les niveaux 1 et 2 possèdent de très bonnes exactitudes. L'exactitude globale du masque de cultures (niveau 1) est de 90 %. Le niveau 2 atteint une exactitude globale de 88 %, et c'est la végétation naturelle qui obtient le F-score

Tableau 29 – Les F-scores pour chaque classe et chaque niveau de classification de l'occupation du sol. Les cases sont colorées en rouge (< 0.5), orange (0.5-0.7), vert (> 0.7). végé = végétation.

Niveau 1		Niveau 2		Niveau 3		Niveau 4		N°
Cultivé 0.90	Cultures 0.90	Soja 0.60	Soja 'vert' 0.56	1				
			Soja 'sénescent' 0.07	2				
		Maïs, Sorgho, Mil 0.47	Maïs, Sorgho, Mil 'vert' 0.40	3				
			Maïs, Sorgho, Mil 'sénescent' 0.60	4				
		Coton 0.42	Coton 'vert' 0.0	5				
			Coton 'sénescent' 0.53	6				
		Riz 0.0	Riz 0.0	7				
Non-cultivé 0.89	Végétation naturelle 0.76	Végé herbacée et arbustes 0.60	Végé herbacée 0.34	8				
			Arbuste 0.20	9				
		Arbre 0.65	Arbre 0.62	10				
			Ombre 0.88	11				
	Sol nu 0.99	Sol nu agricole 0.58	Sol nu agricole 0.58	12				
		Sol nu non-agricole 0.71	Sol nu de type 'cuirasse' 0.63	13				
			Sol nu (autre) 0.73	14				
	Eau 0.95	Eau 0.95	Eau 0.95	15				
	Surface bâtie 0.99	Surface bâtie 0.99	Surface bâtie 1 0.99	16				
			Surface bâtie 2 0.98	17				
OA (%)	90	88	58	49				

le plus faible de ce niveau (0.76). Le niveau 3 possède une OA moyenne (58 %). Il souffre toujours de problèmes, principalement pour le maïs, le coton et le riz (F-score < 0.5).

La Figure 31 compare les différents niveaux de classification sur une même zone de champs. Le niveau 4 contient un niveau de détails inutilement élevé pour cette étude. L'ajout d'un filtre de majorité permet de rendre la carte plus lisible mais, après analyse, n'améliore pas significativement l'exactitude. Le niveau 3 est le niveau idéalement recherché pour cette étude, afin de pouvoir quantifier les ressources organiques (biomasses) en fonction du type de cultures. On peut cependant observer que ce niveau souffre d'erreurs de classifications importantes, certains champs étant classifiés comme du soja ou du maïs, en fonction des pixels. Les seules erreurs visibles pour les niveaux 1 et 2 sont les quelques pixels de cultures identifiés dans les zones de forêts, qui sont en réalité de la végétation herbacée ou des arbustes. Le niveau 2 pourrait être utilisé pour la suite de cette étude. L'avantage est l'exactitude élevée de cette classification, mais il faudrait alors renoncer à quantifier les ressources organiques en fonction du type de culture.

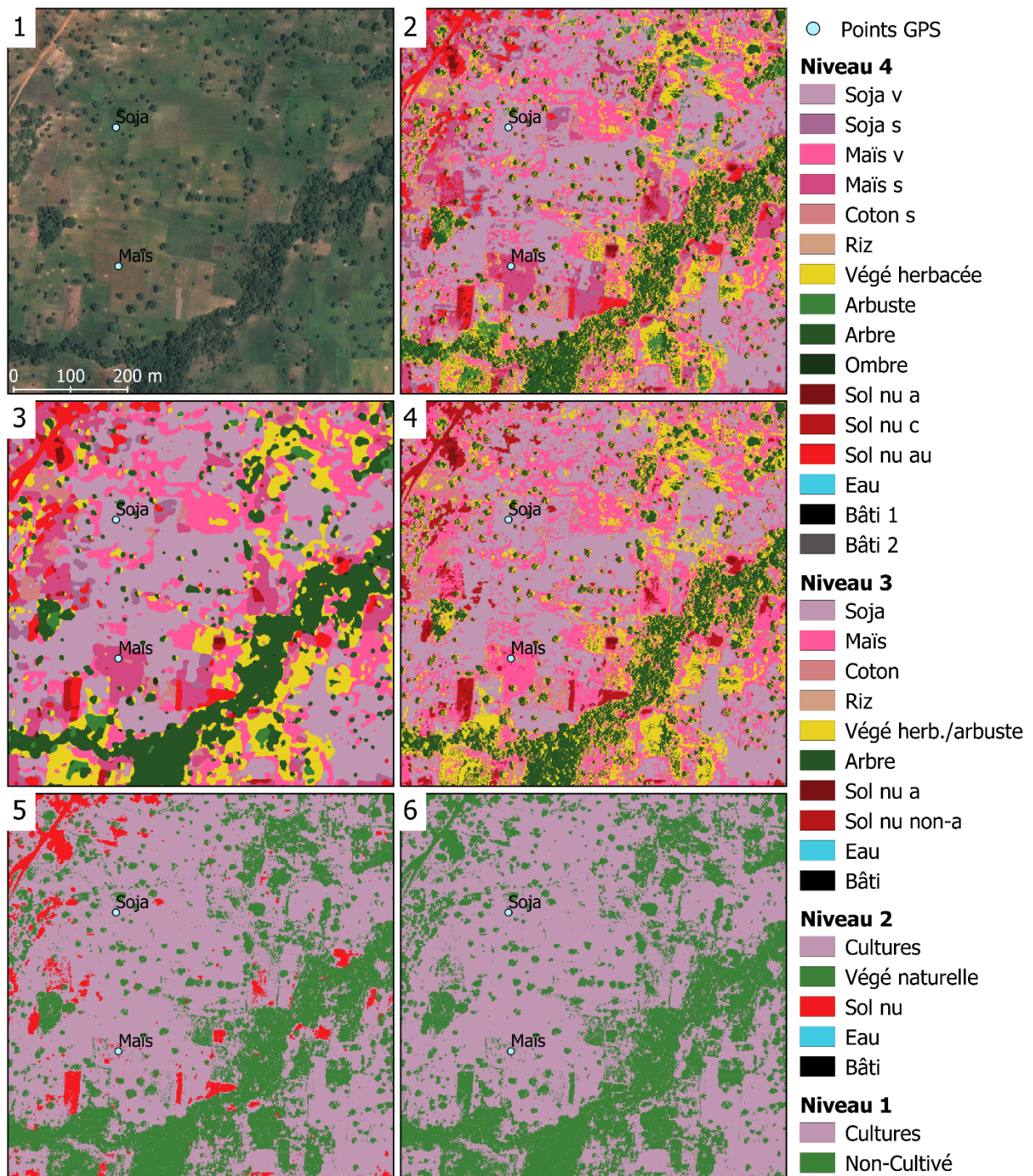


Figure 31 – Comparaison des différents niveaux de classification de l’occupation des sols appliqué sur une zone diversifiée avec des champs, des sols nus, et une forêt galerie. **1)** Image pansharpened en composition colorée 3-2-1 ; **2)** Classification au niveau 4 ; **3)** Classification au niveau 4, après application d’un filtre de majorité ; **4)** Classification au niveau 3 ; **5)** Classification au niveau 2 ; **6)** Classification au niveau 1. v = vert, s = sénescent, a = agricole, c = de type cuirasse, au = autre, végé = végétation.

2.4 Evaluation des classifications hiérarchiques

Au vu des résultats de la classification en une étape, qui montre une confusion entre certaines cultures et d’autres classes de cultures ou la végétation herbacée, la méthode hiérarchique a été utilisée. La classification hiérarchique des sept types de cultures n’a cependant pas permis d’augmenter significativement les performances de la classification. Le

meilleur résultat a à nouveau été obtenu avec le dataset 9, l'OA passant de 49.3 à 49.7 %, mais ceci n'est pas une amélioration significative. La Figure 32 permet de mieux analyser ce résultat. Les pixels changeant de classe se situent principalement dans les zones de transition entre les champs et dans les champs très hétérogènes, mais pas seulement. Cette carte nous permet ensuite de calculer que 23 % des pixels de cultures ont changé de classe après application de la méthode hiérarchique. Cela démontre que, tout en permettant de corriger la classification de certains pixels, la méthode a aussi créé de nouvelles erreurs ou conservé des erreurs (en modifiant la classification erronée d'un pixel vers une autre classe, également erronée). Ce résultat n'est pas significativement meilleur et la classification hiérarchique demande des étapes de calcul supplémentaires. Cette méthode ne sera donc pas retenue ni conseillée pour la classification des territoires des autres villages.

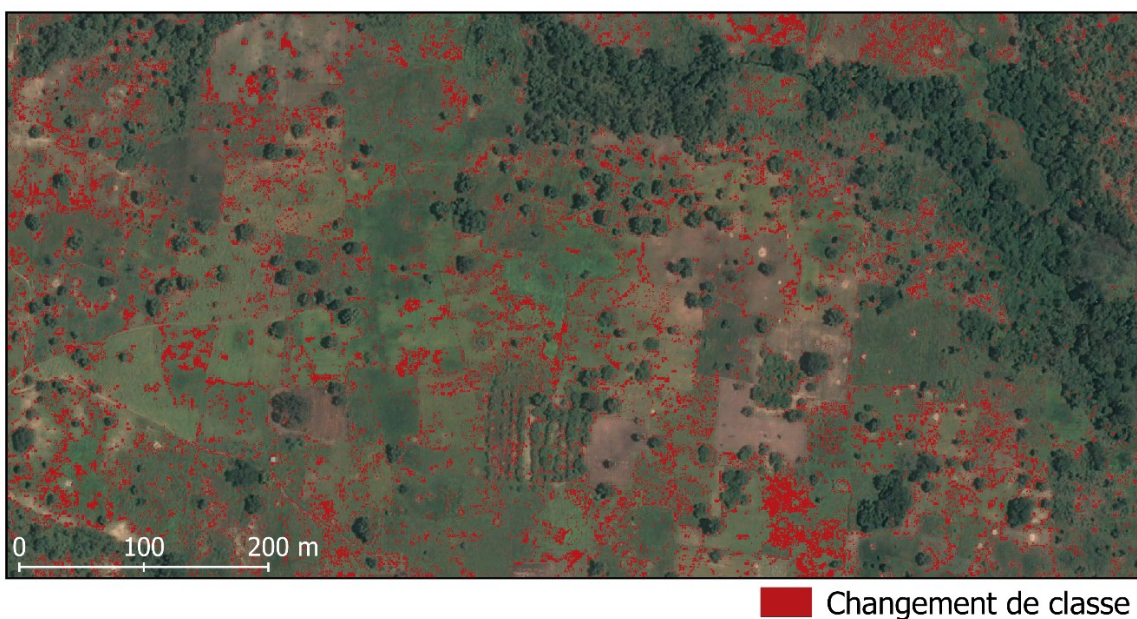


Figure 32 - Zoom sur une zone de Gonri. Les pixels en rouge sont les pixels de la classification qui ont changé de classe suite à la classification hiérarchique.

2.5 Classification finale

La Figure 33 présente la cartographie finale du village de Gonri, selon le niveau 3 et avec les vergers et les zones de maraîchage. Elle possède une exactitude globale de 58 %. C'est ce niveau de classification qui sera utilisé pour la suite de cette étude. On constate que les cultures ne sont pas concentrées autour des habitations, mais réparties sur l'entièreté du territoire.

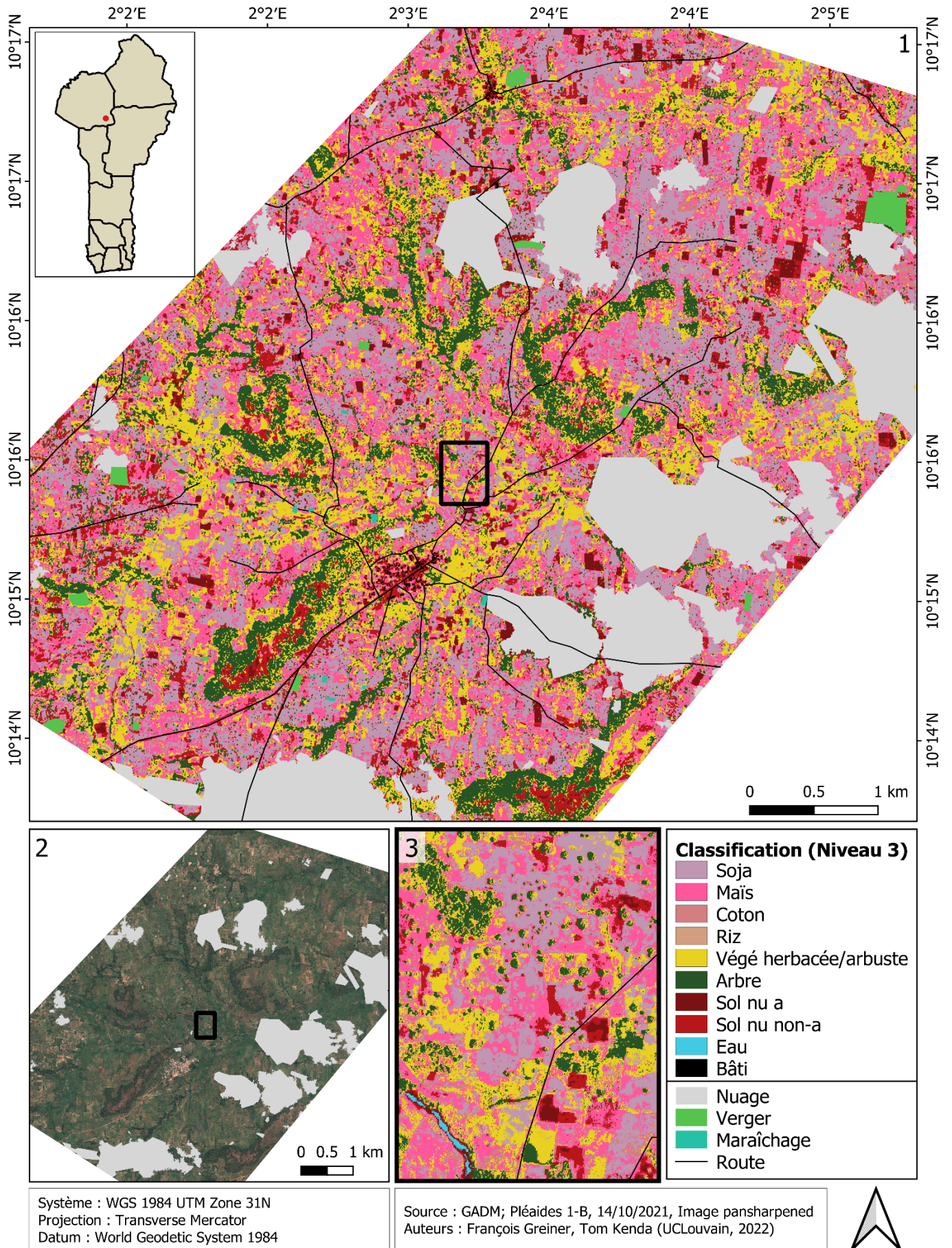


Figure 33 – Cartographie finale de Gonri, sur base du dataset 9. Pour faciliter la visualisation, l'entière du village n'est pas visible. Les classes de vergers, de maraîchage et de routes ont été ajoutées manuellement. Les zones blanches correspondent aux zones à l'extérieur des limites de village, que nous avons définies. Le rectangle noir représente la zone sur laquelle un zoom est effectué au 3). 1) Classification au niveau 3, avec un filtre de majorité ; 2) Image pansharpened de Gonri ; 3) Zoom sur une zone de cultures.

Le Tableau 30 montre que plus de 50 % des surfaces du village sont occupées par des cultures, principalement du maïs et du soja. 22 % sont de la végétation herbacée ou des arbustes. Cette catégorie correspond en partie aux jachères, et en partie aux savanes herbeuses et arbustives, d'après nos observations de terrain. 2 % sont des sols nus de type agricole. Cela signifie qu'au moment de la prise de vue, les sols n'étaient pas occupés, mais ils sont bien cultivés à d'autres périodes de l'année. Les arbres ne représentent que 14 % des surfaces. Une grande majorité du village est donc occupée par des surfaces agricoles. Le recul des formations végétales naturelles est un phénomène bien documenté dans le département de l'Atacora. Entre 1988 et 2020, les zones de cultures dans le nord-ouest de l'Atacora sont passées de 7 à 31 %, au détriment des zones naturelles (Kombienou et al., 2021). Cette évolution rapide peut être expliquée par la croissance démographique importante²⁵, les faibles rendements agricoles qui demandent donc plus de surfaces de culture et le développement des cultures de rente (en particulier le coton) (Kombienou et al., 2022). A l'horizon 2031, il est prévu que cette tendance se poursuive, même selon le scénario « Durabilité Environnementale Coordinée », avec 68 % des surfaces occupées par des cultures ou jachères dans un secteur de l'Atacora (Agbanou, 2018). On remarque que notre estimation pour Gonri (58 %) se situe entre les estimations de 2020 (31 %) et les prévisions pour 2031 (68 %). Même si ces chiffres ne sont pas forcément comparables (prise en compte ou non des jachères), on constate que ce sont les mêmes ordres de grandeur.

Tableau 30 – Les surfaces occupées par chaque type d'occupation du sol, calculées après soustraction des nuages. Vég herb. = végétation herbacée.

Niveau 3	Ha	%
Maïs, Sorgho, Mil	900	27
Soja	740	22
Coton	157	5
Riz	2	0.07
Vergers	20	1
Maraîchage	3	0.08
Sol nu agricole	52	2
Total agricole	1874	57
Vég. herb. et arbustes	747	22
Arbre	466	14
Sol nu non-agricole	271	8
Surface bâtie	3	0.09
Eau	3	0.08
Total non agricole	1490	44
TOTAL	3364	101

²⁵ La population en ASS devrait encore doubler entre 2020 et 2050 (+ 1 milliard) (United Nations, 2019) (cf. l'introduction)

2.6 Discussion

La discussion se concentrera d'abord sur les résultats pour le village de Gonri. Ensuite, nous aborderons la méthodologie qu'il conviendrait de suivre pour les autres villages et la méthodologie que nous recommandons pour de futures études.

2.6.1 Cartographie de Gonri

Pour améliorer les résultats de classification, on peut travailler sur trois éléments principaux : les aires d'entraînement et de validation (ou ROI) formant le jeu de données vectorielles, les *features* ou bandes formant le *dataset*, et finalement l'algorithme et la méthode de classification.

Les différentes classifications essayées, en une étape ou hiérarchiques, ont rapidement montré une saturation du modèle. L'exactitude globale du niveau 4 n'a pas varié significativement, restant toujours entre 45 et 50 %.

Le processus d'amélioration des ROI n'est pas présenté dans ce mémoire. Cependant, les premières classifications, réalisées avec des ROI présentant des défauts, ont donné des exactitudes globales de 30 %. L'amélioration du jeu de données vectorielles a donc été fondamentale, et s'est appuyée sur l'analyse des erreurs des premières classifications. Les ROI ont été modifiées afin de couvrir des zones plus homogènes, des sous-classes ont été créées (vert-sénescent, bâti 1 – bâti 2, arbre-ombre, etc.), l'équilibre entre les ROI de chaque classe a été ajusté en fonction des observations de terrain et des enquêtes, et les ROI trop incertaines ont été supprimées. Le jeu de données vectorielles reste cependant améliorable. Une prise de vue moins tardive (au moment du pic de végétation, en mi-septembre au lieu de mi-octobre) aurait probablement permis de ne pas devoir faire la différence entre les cultures vertes et sénescentes (plus difficiles à différencier). Une campagne de terrain plus longue et réalisée au moment de la capture des images aurait permis de mieux interpréter les images (notamment pour résoudre la confusion dans les champs de riz, discutée dans la section 2.3). Finalement, le téléchargement ou la programmation d'acquisition d'images satellites à très haute résolution prises au pic de végétation l'année d'avant aurait permis de mieux préparer la campagne de terrain.

Pour améliorer les *datasets* formés, on peut travailler sur le choix des images satellites et puis la création de *features* (indices spectraux, de texture, etc.). Pour les images satellites, l'utilisation de séries temporelles aurait permis de s'affranchir du problème des nuages afin d'obtenir une cartographie complète du village, et aurait permis de mieux différencier la végétation grâce au suivi de l'évolution phénologique. En effet, les séries temporelles permettent la création d'une signature temporelle en plus d'une signature spectrale. De nombreuses études montrent que cela permet d'améliorer l'exactitude globale, à condition d'obtenir des images avec une faible couverture nuageuse en saison des pluies (Atzberger, 2013; Karlson et al., 2015). Les arbres pourront par exemple plus facilement être identifiés en saison sèche, et les cultures possèdent des signatures spectrales plus ou moins différentes en

fonction du stade phénologique. Pour mieux pouvoir détecter les subtiles différences entre les signatures spectrales de la végétation, l'ajout de bandes spectrales (principalement dans la gamme IR) et donc l'amélioration de la résolution spectrale aurait été utile. Ici aussi, de nombreuses études ont démontré que l'exactitude augmente avec une meilleure résolution spectrale (Fan et al., 2021). La création de nouveaux *features* avec un grand pouvoir explicatif a été limitée par le choix d'une image Pléiades 1-B unique et à 4 bandes spectrales. Tous les *features* étant créés à partir de ces 4 bandes, l'ajout de ceux-ci crée rapidement de la corrélation au sein du *dataset*, et n'apporte plus de nouvelles informations (Mercier et al., 2019). Précisons aussi que l'ajout de *features* de mauvaise qualité peut diminuer l'exactitude globale, la qualité des *features* est donc tout aussi importante que leur nombre.

Finalement, les paramètres de l'algorithme RF auraient pu être modifiés. Cependant, plusieurs études utilisent les paramètres par défaut en modifiant uniquement le nombre d'arbres (Brennan et al., 2020; Dupuy et al., 2020). Ce choix a également été fait dans ce mémoire, afin de se concentrer sur l'amélioration des données vectorielles et raster.

La classification du village de Gonri a donc permis d'obtenir une exactitude globale de 58 % au niveau 3 (10 classes). Des résultats légèrement supérieurs ont été obtenus dans d'autres mémoires avec des images Pléiades (69 et 70 %; Champagne, 2019; Marissiaux, 2018), mais en utilisant moins de classes. Les surfaces occupées par chacune des dix classes vont maintenant pouvoir être utilisées afin de quantifier les ressources organiques du terroir et ensuite réaliser un bilan de nutriments.

2.6.2 Cartographie des autres villages de l'étude

Deux améliorations peuvent être proposées pour la suite de l'étude, pour les autres villages du Bénin et du Burkina Faso étudiés dans le cadre du projet AGRO-ECO. Premièrement, une classification par objet pourrait être menée. Il faudrait faire une segmentation, suivie d'une classification des objets, puis une édition manuelle importante sur base de photo-interprétations. La très haute résolution spatiale des images Pléiades (0.5 m) révèle beaucoup d'hétérogénéité, dont on pourrait en partie s'affranchir avec la méthode par objet. Cette méthode résulte en des améliorations d'exactitude plus ou moins grandes en fonction des études (Dupuy et al., 2020; Lebourgeois et al., 2017; Peña-Barragán et al., 2011), et elle permettrait donc une meilleure distinction entre les types de cultures. Elle demande cependant une bonne capacité de photo-interprétation. Or, il faudrait collecter de nouveaux points GPS ou posséder des séries temporelles pour une photo-interprétation satisfaisante des cultures.

Deuxièmement, si la distinction entre chaque type de culture est abandonnée car laborieuse et peu exacte, on pourrait se baser sur de récentes cartographies globales de l'occupation du sol à 10 et 30 m (*WorldCover*, *Esri 2020 landcover*, *GlobeLand30* ; voir 13.2). La Figure 34 compare notre cartographie (0.5m) avec les cartographies de l'ESA et d'Esri (10 m). La cartographie chinoise *GlobeLand30* n'a pas pu être comparée suite à des problèmes

techniques sur le site globallandcover.com. On constate que celle de l'ESA identifie des zones de cultures semblables aux nôtres, mais les zones de forêt que nous avons identifiées sont ici majoritairement classées comme savane arbustive. La cartographie d'Esri contient moins de détails et classe une grande partie du village comme prairie d'origine naturelle, mais identifie plus de zones de forêt semblables aux nôtres. Ces deux cartographies ont l'avantage de ne pas contenir de nuages, mais ne permettent pas de distinguer autant de détails (arbres isolés, etc.) que notre cartographie. Comparée à celle d'Esri, la cartographie de l'ESA semble la plus appropriée. Elle pourrait être utilisée pour les autres villages de notre étude. Afin de tout de même pouvoir estimer la superficie occupée par chaque type de culture, les données des enquêtes pourraient être utilisées.

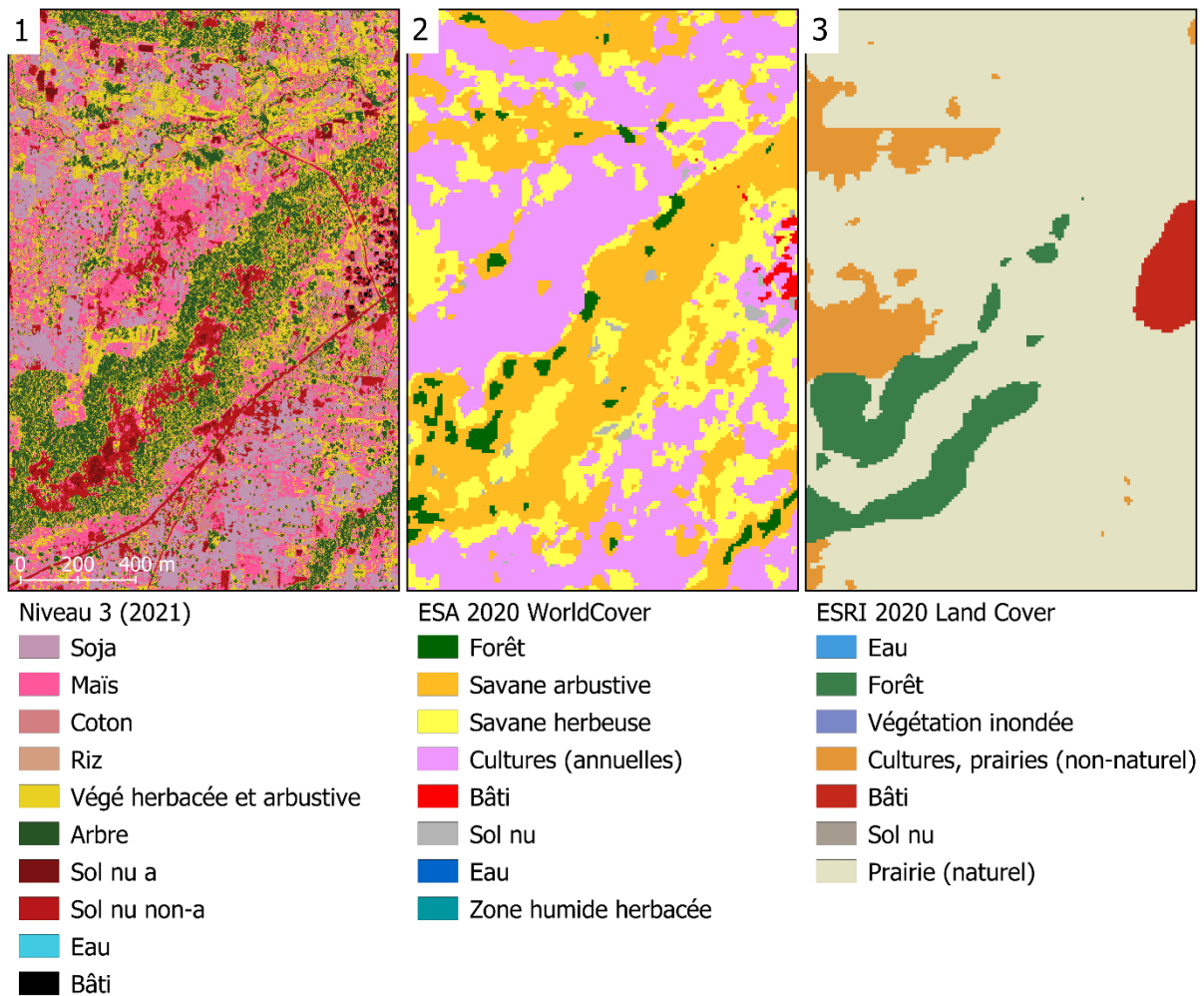


Figure 34 – Comparaison entre trois cartographies d’occupation du sol. **1)** Notre classification, au niveau 3 ; **2)** La WorldCover de l’ESA, à 10m ; **3)** Le Esri Landcover, à 10m. végé = végétation, a = agricole. Source : (ESA, 2020) ; (ESRI, 2020).

2.6.3 Perspectives

Pour de futures études similaires, l’amélioration fondamentale serait l’utilisation de séries temporelles, pour pouvoir suivre l’évolution phénologique. On peut imaginer l’utilisation des images S2 et Pléiades ou uniquement des images S2. Les images S2 paraissent en effet les plus adaptées, avec leurs 13 bandes spectrales et leur résolution temporelle de 5

jours. Selon plusieurs études, leur résolution spatiale inférieure (10 m) permettrait malgré tout de cartographier avec une bonne exactitude des zones d'agriculture de petite taille en régions tropicales (Lambert, 2018; Lebourgeois et al., 2017; Marissiaux, 2018).

3 Quantification des ressources organiques

3.1 Produits de récolte

D'abord, les rendements moyens par spéculation pour l'ensemble des villages ont été calculés sur base des données d'enquêtes. L'analyse de la variance (Anova 2) montre des différences significatives entre certaines spéculations (Figure 35, $F_{\text{value}}=13.35$, $P_{\text{val}}<10^{-4}$).

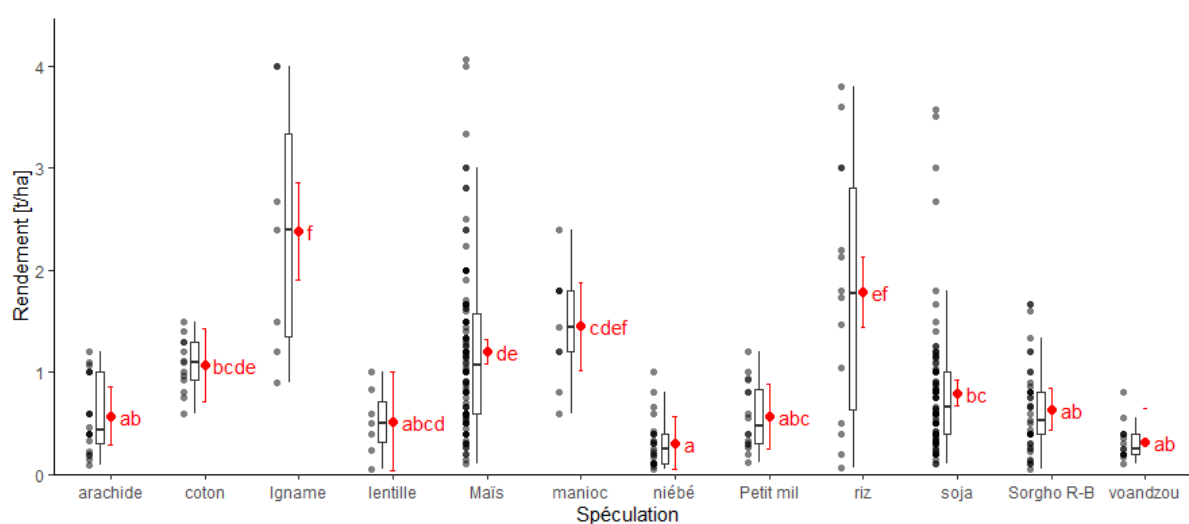


Figure 35 – Rendements déclarés (t/ha) par l'ensemble des agriculteurs (tous villages confondus)²⁶.

Ensuite, les rendements ont été comparés par village pour le maïs, le niébé, le soja et le coton. Aucune différence n'est significative pour le coton ($F_{\text{val}}=1.75$, $P_{\text{val}}=0.21$) et pour le niébé ($F_{\text{val}}=0.78$, $P_{\text{val}}=0.57$). En revanche, les rendements varient significativement d'un village à l'autre pour le maïs ($F_{\text{val}}=6.74$, $P_{\text{val}}<10^{-4}$, Figure 36) et le soja ($F_{\text{val}}=3.97$, $P_{\text{val}}=0.003$, Figure 37).

Les rendements moyens déclarés ont été comparés aux rendements moyens calculés par la FAO pour le Bénin sur la période 2010 – 2020 (sauf pour le niébé, le voandzou et la lentille pour lesquels la FAO ne fournit pas d'informations - FAOSTAT, 2022). Pour ce faire, le rapport « rendement FAO-Bénin / rendement déclaré » a été calculé (Tableau 54, annexe 7.5). Il est proche de 1 pour les trois cultures les plus importantes : le coton, le maïs et le soja (0.95, 1.09 et 1.30 respectivement). Le rapport varie de 1.5 à 2 pour le petit mil, l'arachide, le sorgho et le riz. Enfin, il est le plus grand pour l'igname et le manioc (5.6 et 9.5 respectivement). La

²⁶ Les points noirs représentent les données brutes. Les points rouges et les barres d'erreur représentent les moyennes (marginales estimées) \pm intervalles de confiance à 95 % par groupe. Les moyennes ne partageant pas la même lettre sont significativement différentes par le test de Tukey au niveau de signification de 5 %.

majorité des cultures ont donc un rendement déclaré inférieur à la moyenne du pays, qui peut être dû à un manque d'intrants ou des conditions environnementales trop peu favorables (FAO, 1997). Le rendement potentiel n'est pas non plus atteint comme l'ont constaté d'autres auteurs au Bénin (Chabi et al., 2021; Chianu et al., 2012) Le rendement moyen du pays est atteint seulement pour les cultures qui reçoivent une fertilisation minérale importante (en termes de quantité et de proportion de surface fertilisé), c.-à-d. le coton et le soja.

Deux problèmes sont rencontrés fréquemment lors de la quantification des produits de récolte. Certaines céréales, utilisées pour la consommation locale (sorgho et mil essentiellement) ne sont pas toujours mises dans des sacs de grains de 100 kg. La récolte est stockée directement dans des greniers à grains, ce qui rend la quantification difficile. Aussi, les tubercules comme le manioc ou l'igname sont souvent récoltés tout au long de la saison en fonction des besoins. C'est pourquoi très peu d'agriculteurs connaissent la quantité totale récoltée. Pour ces cultures, les résultats exprimés aux paragraphes précédents devraient donc être validés par des mesures *in situ*.

Il est difficile de qualifier et quantifier l'erreur sur ces résultats. Pour ce faire, il faudrait calibrer les dires des agriculteurs avec des mesures réelles (Sapkota et al., 2016). L'incertitude sur le rendement peut venir de la surface de la parcelle ou de la quantité de récolte déclarée par l'interrogé. La calibration n'a pas été faite pour les surfaces, mais pour les quantités récoltées nous savons que les « sacs de 100 kg » pèsent en réalité entre 90 et 110 kg. La mesure n'est donc pas précise mais si le nombre de points est suffisant la moyenne devrait être exacte.

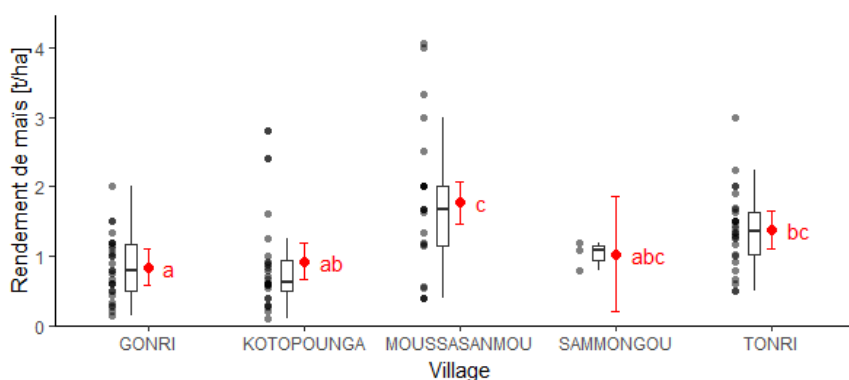


Figure 36 – Rendements déclarés (t/ha) de maïs par village²⁶.

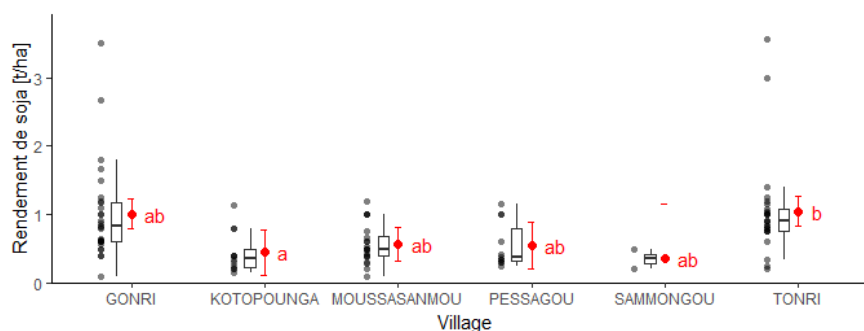


Figure 37 – Rendements déclarés (t/ha) de soja par village²⁶.

3.2 Résidus de culture

Les rendements moyens en résidus de culture ont été calculés sur base de l'échantillonnage. Les maïs est la seule culture pour laquelle nous disposons d'un nombre suffisant d'observations valides. Le rendement estimé est de de 3285 ± 364 kg MS/ha. Il se situe bien dans la gamme des valeurs observées par Tovihoudji (2018) durant trois ans d'expériences avec différents traitements (entre 1 et 7 Mg Ms/ha).

Le rendements en résidus des autres cultures importantes de Gonri (riz, coton et soja) ont été calculés sur base du rendement en produits de récolte moyen déclaré, et des indices de récolte tirés de la littérature. Plusieurs études ont été comparées et les indices moyens (pour plusieurs variétés et traitements) les plus adaptés au contexte de notre étude ont été choisis (Tableau 31).

Tableau 31 – Estimation des rendements en résidus sur base des rendements en produits déclaré et des indices de récolte (IR) de la littérature.

	Produits de récolte [kg/ha]	IR moyen	Résidus [kg/ha]	Sources de l'IR
Coton	1073	0.36	1896	(Loison et al., 2017; Waghmare et al., 2018)
Soja	1009	0.38	1646	(Agegn et al., 2022; Krisnawati & Adie, 2015)
Riz	1782	0.50	1751	(Ansah et al., 2017)

3.3 Biomasse herbacée

Après conversion de la MF en MS et pondération par la fréquence de chaque strate, une phytomasse par transect est obtenue (Figure 38.C). Les mesures ont été évaluées en fonction de différents facteurs potentiellement explicatifs (Figure 38 A, B et D). Le facteur « type de végétation » semble le plus approprié pour l'analyse ultérieure car c'est un élément directement identifiable sur la carte d'occupation du sol réalisée et qui est combinable avec l'analyse de la dynamique de la végétation (cf. III.5.3.1). Après multiplication de la phytomasse de chaque transect par le rapport phytomasse maximale / phytomasse à la mi-août (calculé à la section III.5.3.1), les biomasses herbacées estimées sont de 1930 et 3440 kg MS/ha pour les forêts claires et les savanes herbacées, respectivement. Ces deux moyennes ne sont pas significativement différentes ($P_{val} = 0.09$) car le nombre d'observations est assez faible et car une des mesures de la strate herbacée est très faible. Sans ce dernier point, les moyennes

deviennent significativement différentes ($P_{val} = 0.01$), mais il a été gardé dans l'analyse pour tenir compte de l'hétérogénéité des faciès.

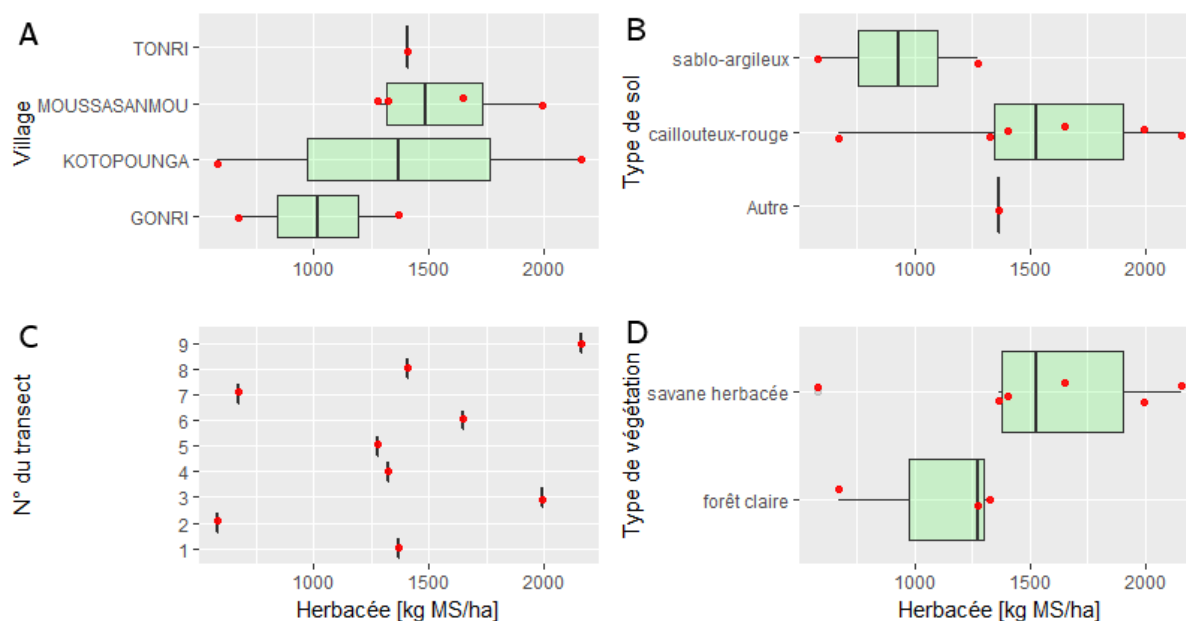


Figure 38 – Rendement en biomasse herbacée en fonction des différents facteurs explicatifs : (A) village, (B) type de sol, (C) transect, et (D) type de végétation. Chaque point représente la moyenne mesurée pour un transect à la mi-août.

La biomasse herbacée disponible comme fourrage pour le bétail est certainement le terme le plus incertain de tout le bilan de ressources organiques. Les valeurs calculées ici (1.9 et 3.4 Mg/ha) sous-estiment probablement la phytomasse réelle au moins pour deux raisons. D'une part, les échantillons ont été pris sur des zones qui ont déjà été broutées depuis le début de la saison de croissance. La phytomasse estimée ne reflète donc pas la croissance totale de phytomasse jusqu'à mi-août. Pour prendre cela en compte, il convient de mettre les zones d'échantillonnage en défens (Agonyissa & Sinsin, 1998). D'autre part, les études qui réalisent des coupes plusieurs fois sur l'année montrent que la somme des coupes est supérieure à la biomasse mesurée au pic de végétation (jusqu'à trois fois plus, Scurlock, 2002; Sinsin, 1993).

La phytomasse obtenue au pic de végétation dans des régions similaires varie entre 3.6 et 6.6 Mg MS/ha pour les savanes herbeuses, et entre 2.9 et 5.1 pour les savanes arborées (annexe 1.5). Les valeurs obtenues par régression à partir des données pluviométriques sont 7.4 et 5.7 Mg MS/ha pour la méthode régionale et locale respectivement (cf. III5.3.1). L'utilisation de ces données de la littérature pourrait donc doubler notre estimation. L'acquisition de plus de mesures serait nécessaire pour réduire l'incertitude.

3.4 Biomasse foliaire ligneuse

Les transects sur les arbustes, les arbres en savane et les arbres en champs ont permis de déterminer le pourcentage de surface de couronne d'arbres qui représente un apport fourrager pour les animaux (Tableau 32). Cette mesure est utilisée comme coefficient d'appétibilité (cf. III4.3). Ils sont de 28 et 41 % pour les arbres et les arbustes respectivement.

Le lecteur notera que les espèces pour lesquelles nous n'avions pas d'informations (« inconnu » dans le Tableau 32) ont été classées comme « aucun apport fourrager ». Ce choix pourrait induire une sous-estimation des coefficients. En effet, de nombreux éleveurs rapportaient qu'en période de soudure, si la nourriture se fait rare, les animaux sont parfois amenés à manger des ressources qui sont habituellement très peu appréciées.

Tableau 32 – Surface de couronne totale sur l'ensemble des transects par type d'apport fourrager.

	Apport fourrager ?	Surface de couronne	
		m ²	%
Arbres	Non	2538	62%
	Oui	1150	28%
	Inconnu	381	9%
	Total arbres fourrager	1150	28%
Arbustes	Oui, en saison des pluies	0.1	0.3%
	Oui, en saison sèche	14.6	39.3%
	Oui, toute l'année	0.4	1.2%
	Jamais	0.9	2.5%
	Inconnu	21.0	56.7%
	Total arbustes fourrager	15.0	41.0%

3.5 Bilan des ressources organiques valorisables à l'échelle du terroir

En combinant les résultats de cette section et la précédente, ainsi que les valeurs de la littérature présentées dans la méthodologie (cf. III4 et III5.3), on obtient une phytomasse totale potentiellement prélevable de 3.3 et 2.0 Mg MS/ha pour les savanes et forêts respectivement (Tableau 33).

Tableau 33 – Bilan final de phytomasse pour les zones de savane et forêt. Les lettres rappellent la source de chaque valeur et renvoient vers les différentes sections.

Type de végétation	Elément	Biomasse totale [kg/ha]	Coef. appétibilité	Biomasse appétibile [kg/ha]	Coef. préservation	Biomasse prélevable [kg/ha]
Savane herbeuse	Herbe	3441 a	0.95 c	3269	1 c	3269
	Feuille	430 b	0.41 d	176	0.2 c	35
Forêt claire	Herbe	1931 a	0.9 c	1738	1 c	1738
	Feuille	5530 b	0.28 d	1548	0.2 c	310

Note : 'herbe' = biomasse herbacée ; 'feuille' = biomasse de feuille de la végétation ligneuse. Rappel des sources de données : a = sur base de mesures ponctuelle (IV3.3) et du rapport aout/max (III5.3.1) ; b = littérature (III4.3) ; c = littérature et données de terrain, cf. Tableau 20 (III5.3.2) ; d = mesures de terrain (IV3.4).

L'incertitude est aussi importante sur la phytomasse foliaire totale disponible puisque l'estimation repose uniquement sur l'analyse de la littérature et non des données de terrain. Néanmoins, l'impact de cette incertitude sur le bilan total est moins important car la phytomasse foliaire prélevable est faible par rapport au total. Selon les calculs de Sinsin (1993, au nord du Bénin), le bétail prélève environ 7 kg de feuillage (MS) par ha, ce qui est plus faible que nos estimations.

Les surfaces pour chaque occupation du sol, obtenues lors de la caractérisation du terroir par télédétection, sont utilisées pour réaliser un premier bilan de la matière organique disponible à l'échelle du terroir de Gonri (Tableau 34). Pour rappel, seules les cultures les plus importantes du village sont retenues pour les bilans (soja, maïs, coton et riz). Ce bilan donne un ordre de grandeur de la phytomasse disponible. Celle-ci pourrait être valorisée directement (incorporation dans le sol, etc.) ou indirectement (après compostage, digestion par le bétail, etc.) pour la fertilisation des champs dans le cadre de l'agroécologie. Le réservoir le plus important du village est la culture du maïs, qui génère une quantité importante de résidus, suivi par les savanes herbeuses et la culture du soja, qui semblent occuper des surfaces importantes dans le village.

Comme discuté ci-dessus, la biomasse herbacée des savanes et forêts est le terme le plus incertain. Si l'on remplace nos deux mesures de rendement herbacée par 5.7 Mg/ha (estimation locale par régression à partir de la pluviométrie), la biomasse herbacée totale passe de 3.2 à 6.4 Gg, soit le double. Sur la phytomasse totale valorisable cela représente une augmentation de 140 %.

Tableau 34 – Bilan de phytomasse valorisable pour la fertilisation des champs pour le village de Gonri

Type de végétation	Superficie [ha]	Rendement* [kg/ha]	Phytomasse totale valorisable [Mg]
Soja	761	1646	1252
Maïs	925	3285	3038
Coton	162	1896	307
Riz	9	1751	16
Herbe de savane	747	3269	2443
Feuillage de savane	747	35	26
Herbe de forêt	466	1738	810
Feuillage de forêt	466	310	144
Total	3070		8037

*rendement en résidus ou fourrage (sans compter les produits de récolte)

4 Bilans de nutriments

Les résultats de la caractérisation des pratiques de fertilisation, des surfaces de chaque occupation de sol et du bilan de ressource organique ont été combinés pour réaliser trois bilans de nutriments. Cette section présente et discute les hypothèses et résultats relatifs à chacun des 3 scénarios.

4.1 Résultats des scénarios

4.1.1 Scénario 1 : fertilisation actuelle & résidus 100 % laissés en champ

Les hypothèses du premier scénario sont les suivantes :

- a) Engrais minéraux : dose appliquée basée sur les pratiques actuelles (IV1.3).
- b) Résidus de cultures : on considère qu'ils sont 100 % laissés sur le champ et sont décomposés directement ; il n'y a pas de perte de nutriments à ce niveau-là.

- c) Restitution des déjections animales sur les cultures : l'hypothèse b) implique que les animaux ne mangent pas les résidus de culture, il n'y a donc pas de divagation ou de parcage dans les champs qui pourrait amener de nutriment des savanes ou des résidus par les déjections.

La mise en équation de ces hypothèses génère le bilan suivant (Tableau 35, Figure 39.a) :

Tableau 35 – Bilans partiels, bilans complets et NuUE pour d'azote et de phosphore du premier scénario. Les noms des termes sont indiqués à gauche du tableau et les unités relatives à chaque ligne sont à droite (BNF = fixation d'azote biologique).

	Spéculation	Soja		Maïs		Coton		Riz		
	Surface	761		925		162		9		[ha]
	Nutriment	N	P	N	P	N	P	N	P	
INPUT	Minéral	1.3	0.3	11.9	2.8	54.4	16.7	5.6	1.8	
	Organique	0.0	0.0	0.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	[kg/ha]
	Déposition	7.9	1.0	7.9	1.0	7.9	1.0	7.9	1.0	
	BNF*	56.0	0.0	3.7	0.0	3.7	0.0	3.7	0.0	
OUTPUT	Produits	62.5	5.0	11.8	2.4	31.1	5.7	23.2	4.5	
	Résidus	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	[kg/ha]
	Lixiviation	0.0	0.0	4.5	0.0	22.5	0.0	13.6	0.0	
	Pertes gaz	1.0	0.0	2.0	0.0	5.0	0.0	1.9	0.0	
BILAN	Partiel	-61.3	-4.7	1.0	0.5	23.3	11.0	-17.5	-2.6	[kg/ha]
	Complet	1.6	-3.7	6.1	1.5	7.4	12.0	-21.3	-1.6	
	Partiel	-46.63	-3.58	0.89	0.47	3.77	1.78	-0.16	-0.02	[Mg]
	Complet	1.20	-2.79	5.68	1.43	1.20	1.95	-0.20	-0.01	
	NuUE	49.8	14.7	0.9	0.8	0.6	0.3	4.1	2.4	[-]

Différents éléments du bilan peuvent être discutés. Tout d'abord, pour le soja et le riz, on voit que l'apport de nutriments par la fertilisation minérale ou organique est largement inférieur aux exportations des produits de récolte (près de quatre fois inférieur pour le riz). Cela résulte en un NuUE bien supérieur à 1 et même un bilan complet négatif pour le riz, car les autres apports sont relativement faibles. Pour le soja, ces exports sont presque entièrement compensés par la fixation d'azote symbiotique (estimée à 52.2 kg N/ha), rendant ainsi le bilan complet légèrement positif (1.6 kg N/ha). En revanche, la perte de P n'est pas compensée. Trois termes sont donc négatifs dans les bilans complets : de l'ordre de -4 kg P/ha pour le soja et -21, -2 kg/ha respectivement pour le N et P des champs de riz.

Ensuite, pour le maïs, le système semble bien à l'équilibre dans ce scénario. Le NuUE est proche de 1 autant pour N que P. C'est principalement dû à une fertilisation minérale bien équilibrée globalement. Toutefois, il ne faut pas oublier que ce terme est calculé comme le pourcentage de surface fertilisée fois la dose moyenne calculée par ceux qui fertilisent - cf. Eq. (6) - . Comme 52 % des surfaces de maïs sont fertilisées à Gonri, cela signifie que la moitié des surfaces reçoivent deux fois la quantité nécessaire (pour un équilibre théorique) alors que les autres sont certainement en déficit.

Enfin, pour le coton, les exportations de fibres sont plus que largement compensées par la fertilisation minérale. Ces excès de N et P mènent à un NuUE bien inférieur à 1 et à des pertes d'azote par lixiviation importante (22.5kg N/ha). Dans ce cas-ci, le constat est valable pour l'ensemble des parcelles, car 100 % des surfaces de coton sont considérées comme fertilisées chimiquement. Le lecteur notera cependant qu'un surplus de P n'est pas toujours synonyme d'une disponibilité suffisante en P pour la plante. C'est particulièrement vrai pour les régions tropicales où le phosphate se lie souvent aux oxydes de Fe ou d'Al (Zhang et al., 2020). Ce surplus de P est donc peut-être nécessaire pour assurer une absorption suffisante par le coton.

Si l'on regarde à l'avant-dernière ligne du Tableau 35 (bilan complet, en [Mg]), on voit que les sommes des bilans de N et P des quatre cultures sont positives : le surplus est de 7.9 et 0.6 Mg de N et P globalement. En théorie, cela signifie que les surplus de certaines spéculations (comme les résidus de maïs par exemple) pourraient être utilisés pour équilibrer les bilans négatifs d'autres cultures. En pratique, cette solution n'est probablement pas facile à mettre en place au vu du manque de moyens de transport constaté lors des enquêtes. Néanmoins, c'est une solution qui a déjà été testée et a fait ses preuves au nord du Bénin (J. Djenontin et al., 2011).

Tableau 36 – Apport de nutriments des savanes après conversion des phytomasse en nutriments et en tenant compte du coefficient d'appétibilité et de préservation. Le terme « total en déjection » tient aussi compte des pertes de 40 et 87 % de N et P par l'animal entre l'ingestion et l'excrétion. Les inputs sont calculés en multipliant les rendements en phytomasse (cf. IV3.5) par les teneurs en nutriment (cf. III5.3.2, Tableau 20).

Occupation de sol	Surface [ha]	Input [kg/ha]		Nutriments totaux [Mg]	
		N	P	N	P
Herbe de savane	747	33.0	2.5	24.7	1.9
Feuillage de savane	747	1.2	0.1	0.9	0.07
Herbe de forêt	466	17.6	1.3	8.2	0.6
Feuillage de forêt	466	10.5	0.9	4.9	0.4
Total des savanes du terroir				38.7	3.0
Total en déjections				15.5	2.6

Le recyclage au sein même du système agricole permet déjà un bilan positif. On peut tout de même évaluer l'apport de nutriments des zones de savanes via les déjections animales (Tableau 36). Toutefois, l'apport des déjections devrait se faire manuellement (et non par parcage ou divagation à cause de l'hypothèse 1.b) de ce scénario). Cet apport permettrait aussi de rendre le bilan positif, tout en évitant de devoir transporter les résidus d'une culture pour les utiliser comme amendement sur une autre culture.



Figure 39 – Présentation simplifiée des bilans complets des scénarios 1, 2 et 3 (de haut en bas) pour le village de Gonri.

Plusieurs critiques peuvent être émises pour ce scénario 1, notamment à cause de l'hypothèse b) (100% des résidus laissés au champ). Dans un contexte d'agriculture en ASS, cette hypothèse est difficilement applicable. En général, les résidus sont mangés, car il n'y a pas de séparation physique entre les lieux de pâture et les champs (vaine pâture). S'ils ne sont pas mangés, ils sont souvent brûlés. De plus, le problème du transport des déjections persiste : les moyens de transport à dispositions des agriculteurs sont souvent limités (cf. IV1.5).

4.1.2 Scénario 2 : fertilisation actuelle & résidus 90 % mangés par le bétail

Les hypothèses du second scénario sont les suivantes :

- a) Engrais minéraux : dose appliquée basée sur les pratiques actuelles (IV1.3).
- b) Résidus de cultures : on considère que 90 % sont mangés par le bétail, cette fraction correspond bien aux dires des agriculteurs et aux résultats d'autres auteurs (comme Diarisso, 2015). Pour le coton, selon nos enquêtes, seuls 25 % des résidus sont mangés (c'est-à-dire les feuilles). Il y a des pertes entre l'ingestion et l'excrétion de nutriments.
- c) Restitution des déjections animales sur les cultures : le bilan sera fait avec une restitution de 50 et 100 % (qu'on nommera respectivement « bilan-50 » et « bilan-100 »). Ce dernier nombre (100 %) est plutôt théorique, le premier est possible si le bétail passe un certain temps sur les cultures et/ou si les déjections sont récoltées et reversées sur les cultures. Djaby (2010) a observé des coefficients entre 36 et 65 % en fonction des terroirs.

La Figure 39b présente le bilan des terres agricoles cultivées pour le scénario 2. Le tableau détaillé se trouve en annexe (Tableau 55).

Quand on tient compte de l'exportation des résidus par le bétail, le bilan est négatif pour toutes les spéculations et tous les nutriments. Seul le coton a un bilan complet positif si l'on considère que les tiges sont enfouies dans le sol et pas brûlées.

L'ingestion des fourrages des savanes et des résidus permet de restituer au maximum 32.9 et 10.1 tonnes de N et P via les déjections (Tableau 37). Si l'on considère que 50% des déjections ne sont pas récupérables pour la fertilisation, ce nombre est diminué de moitié.

Tableau 37 – Calcul d'ingestion et d'excrétion des nutriments des savanes et des résidus en [Mg]. Les nutriments totaux des savanes du terroir sont calculés au Tableau 36.

Nutriments ...	N	P
... totaux des savanes du terroir*	38.7	3.0
... des résidus ingérés (90%)	43.5	8.6
<i>Total savane + résidus</i>	<i>82.1</i>	<i>11.6</i>
... restitués par le bétail	32.9	10.1
... restitués sur les cultures (50%)	16.4	5.0

Le déficit total de nutriments est calculé comme la somme des bilans complets pour les spéculations ayant un bilan négatif (ainsi on ne tient pas compte d'un potentiel transfert de nutriments des spéculations ayant un bilan positif vers celles ayant un bilan négatif). Ici, il est

de 36 et 10 Mg pour N et P (Tableau 38). Même si 100 % des déjections pouvaient être récupérés pour la fertilisation, l'apport de nutriments ne serait pas suffisant pour rendre le bilan d'azote positif (« bilan-100 », Tableau 38). Si 50 % des déjections sont restituées aux champs, le déficit devient de l'ordre de -20 et -5 Mg de N et P (« bilan-50 », Tableau 38).

Une manière de combler ce déficit est d'augmenter l'apport en fertilisants minéraux. Par exemple, si les doses appliquées par certains agriculteurs actuellement (cf. les résultats d'enquêtes, IV1.3) étaient appliquées sur 100 % des surfaces, le bilan-100 deviendrait totalement positif et le bilan-50 ne serait plus négatif que de -3 Mg pour N (détails de ce « scénario 2.1 » dans l'annexe 8.1.2).

Tableau 38 – Bilans complets des spéculations en déficit, apport potentiel de nutriment par le bétail, et bilan global (pour le scénario 2). Les « bilan-100 » et « bilan-50 » correspondent aux bilans où, respectivement, 100 et 50 % des déjections animales seraient récupérées et apportées aux cultures en déficit.

	Bilan complet [Mg]	
	N	P
Soja	-11.2	-5.8
Maïs	-24.8	-4.2
Riz	-0.3	0.0
Déficit total	-36.3	-10.0
Apport du bétail (100%)	32.9	10.1
Bilan – 100	-3.4	0.1
Apport du bétail (50%)	16.4	5.0
Bilan – 50	-19.9	-5.0

Notons que l'azote est le terme le plus négatif, en partie car il est le moins bien restitué après la digestion (seulement 40 % contre 87 % pour P). La fertilisation minérale pourrait être adaptée pour prendre cela en compte (par exemple via l'urée).

Selon nos enquêtes, les pratiques en termes de gestion des résidus ont évolué ces dernières années et les résidus sont de moins en moins brûlés. Une bonne partie est laissée sur pieds et/ou broutée par le bétail (sauf pour les tiges de coton et de soja). Ce deuxième scénario est donc plus réaliste que le premier. Le défi réside dans la gestion des troupeaux pour une valorisation maximale des déjections. Aussi, les pertes de nutriments des déjections par lessivage, volatilisation et lixiviation n'ont pas été prises en compte. Le déficit des bilan-50 et bilan-100 sont donc probablement sous-estimés.

4.1.3 Scénario 3 : une transition agroécologique sans fertilisants minéraux ?

Les hypothèses du troisième scénario sont les suivantes :

- Engrais minéraux : pas appliqués ici. L'idée est d'évaluer la possibilité de se passer d'intrants chimiques comme le prônent certains auteurs pour l'agroécologie.
- Résidus de cultures : 90 % sont mangés par le bétail (et 25% pour le coton).
- Restitution des déjections animales sur les cultures : toujours 50 et 100 %.

La Figure 39c présente le bilan complet du scénario 3. Le tableau détaillé se trouve en annexe (Tableau 57).

À part pour le soja, qui bénéficie toujours de la fixation symbiotique, tous les inputs ont fortement diminué, atteignant tous 12 et 1 kg/ha de N et P respectivement (c'est-à-dire la somme de la déposition atmosphérique et de la fixation asymbiotique). Le bilan complet est donc négatif pour l'ensemble des spéculations et nutriments. Dans ce système sans input, la culture de légumineuses est la plus intéressante. En théorie, c'est la seule qui pourrait avoir un bilan d'azote positif si les résidus étaient directement incorporés dans le sol.

Tableau 39 – Bilans complets des spéculations en déficit, apport potentiel de nutriment par le bétail, et bilan global (pour le scénario 3). Les « bilan-100 » et « bilan-50 » correspondent aux bilans où, respectivement, 100 et 50 % des déjections animales seraient récupérées et apportées aux cultures en déficit.

	Bilan complet [Mg]	
	N	P
Soja	-12.2	-6.1
Maïs	-32.0	-6.8
Coton	-4.9	-0.9
Riz	-0.3	0.0
Déficit total	-49.3	-13.8
Apport du bétail (100%)	32.9	10.1
Bilan – 100	-16.4	-3.7
Apport du bétail (50%)	16.4	5.0
Bilan – 50	-32.9	-8.7

La somme des déficits s'élève à -49.3 et -13.8 tonnes de N et P et elle ne peut être compensée par un apport de nutriment des savanes du terroir même si 100 % des déjections sont valorisées (Tableau 39).

Dans ce scénario, une manière de combler le déficit est de considérer une surface de savane et une quantité de bétail plus grande. On augmente ainsi la quantité de déjections qui pourrait être récupérées. En gardant l'hypothèse des 50 % de restitution, il faudrait un apport supplémentaire de l'ordre de 33 et 9 Mg de N et P des savanes. Cela correspond à une surface supplémentaire de savane herbeuse de 4800 ha si l'on ne tient compte que de l'azote, et 8000 ha si l'on tient aussi compte du phosphore. C'est-à-dire une augmentation de 645 ou 1070% de la surface de savane. Pour combler le déficit d'azote et phosphore, la surface de savane nécessaire pour fournir les nutriments d'un ha de champs par l'intermédiaire du bétail (en anglais *rangeland : cropland ratio*) est de 5 ha de savane pour 1ha de champs (détails des calculs en annexe, Tableau 58). Selon Powell et al. (1996, p.159), au Sahel, « *ce ratio varie généralement entre 15 et 45 ha de pâturages nécessaires pour faire vivre le bétail nécessaire à la fertilisation adéquate d'un hectare de terre cultivée (Quilfen & Milleville. 1981: Breman & Traork, 1987; Swift et al., 1989; van Keulen & Breman, 1990)* ».

Il est difficile de dire si ce scénario est réaliste. L'augmentation de la zone de pâturage n'est pas impossible, car les limites du village sont entourées d'une bonne partie de savane.

Cependant, la cartographie actuelle de Gonri inclut peut-être déjà des savanes d'un autre village, car les limites utilisées ne sont pas très précises. De plus, la surface demandée est très importante et n'est probablement pas compatible avec la pression démographique actuelle. Cette solution semble donc peu soutenable, surtout à long terme.

4.2 Discussion des scénarios et bilans

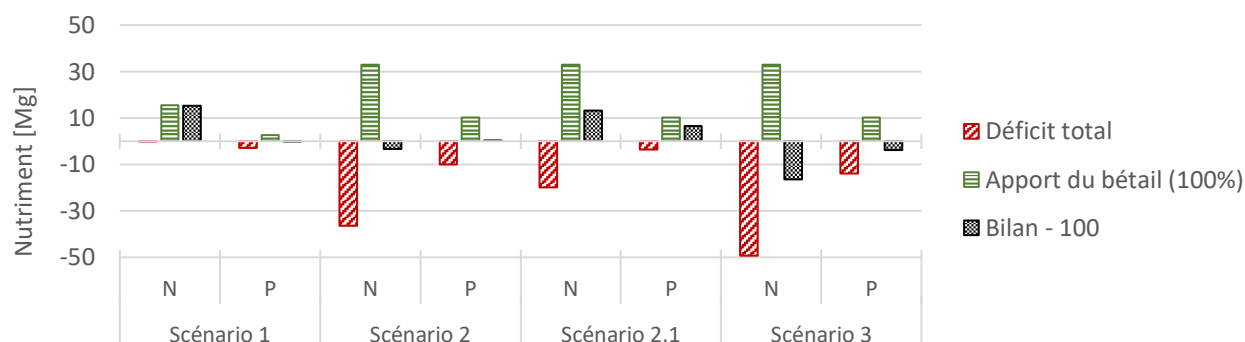


Figure 40 – Bilan de N et P [Mg] à l'échelle du terroir (surface agricole et savanes) de chaque scénario. Le déficit total est la somme des bilans complets négatifs de toutes les spéculations. L'apport du bétail est la quantité de nutriment restituée par les animaux si l'on considère 100 % des déjections. Le bilan-100 est la différence des deux.

La Figure 40 permet de comparer les différents scénarios au regard des déficits des surfaces agricoles et de l'apport potentiel par le bétail. Le premier scénario est le plus efficace en termes de recyclage de nutriments, car il évite les pertes liées à la transformation par l'animal. Le bilan global peut être positif en ajoutant quelques apports supplémentaires (fertilisants organiques ou minéraux). Cependant, dans ce contexte, l'hypothèse des 100 % des résidus décomposés sur le champ s'applique difficilement. Le second scénario semble le plus réaliste, car le broutage des résidus est fréquent et demande moins de travail aux agriculteurs. Néanmoins, les pertes liées à l'ingestion impactent négativement le bilan. Pour le rendre positif, il faudrait assurer un recyclage très efficace des nutriments par les animaux (parcage sur les cultures et collecte des déjections), et adapter un peu la fertilisation minérale. Le bilan du troisième scénario est largement négatif et demanderait une surface de savane qui semble trop importante dans ce contexte.

Les bilans négatifs pour N et P sont courants en ASS (Roy et al., 2003²⁷ ; Smaling et al. ; 1993²⁷ ; Tovihoudji, 2018). Toutefois, les bilans réalisés ici sont presque tous plus de deux fois moins négatifs que ceux rapportés par Smaling et al. (1993)²⁷. Ils étaient inférieurs à -100 et -10 kg/ha pour N et P, respectivement, selon les auteurs.

Dans ces scénarios, la surface agricole totale du village est considérée comme occupée par les quatre spéculations principales du village. Par exemple, la classification du territoire n'a pas permis de faire la distinction entre le maïs, le mil et le sorgho (cf. Tableau 29). Cette approximation a permis de réduire le temps de calcul et le nombre de données nécessaires. L'erreur liée à cette approximation est moindre pour le flux OUT 1, car les rendements moyens

²⁷ Cité dans Biielders, 2015.

en grain de sorgho, de mil et de maïs à Gonri ne sont pas significativement différents. Pour le flux IN 1, en revanche, l'approximation est moins bonne, car la fertilisation minérale du sorgho et du mil est 3 à 4 fois moins importante que celle du maïs. Une meilleure classification des cultures ou un échantillonnage plus grand lors des enquêtes permettrait un bilan plus détaillé et précis. De plus, pour une même spéculation, il sera intéressant de réaliser un bilan par type d'agriculteur. D'importantes différences ont déjà été observées au sein d'un même village, par exemple entre les agriculteurs qui possèdent du bétail et ceux qui n'en ont pas (Roy et al., 2003)²⁷.

Aussi, les bilans réalisés sont des estimations pour une seule année. De nombreux paramètres (comme les rendements, doses de fertilisant, etc.) sont dépendants d'un grand nombre de variables internes ou externes au système (la pluviométrie, le prix des intrants, des changements sociaux, etc.) or, toutes ces interactions n'ont pas été modélisées. Par exemple, le modèle ne tient pas compte d'une potentielle augmentation du rendement liée à une meilleure fertilisation, ce qui devrait pourtant être l'objectif au vu de la sous-alimentation et de la croissance démographique. Les changements de pratiques proposés pour chaque scénario sont aussi susceptibles de faire évoluer le système. Le modèle ne peut donc pas être utilisé tel quel, sans adaptation pour d'autres villages ou d'autres années.

L'incertitude sur la quantité de biomasse herbacée se répercute sur la quantité de nutriments potentiellement recyclables par le bétail. Cette quantité de nutriments pourrait elle aussi doubler si l'on utilisait la moyenne estimée à 5.7 Mg/ha. Dans ce cas, le bilan-100 du scénario 2 deviendrait positif et le bilan-50 serait presque à l'équilibre. L'incertitude sur les autres termes tels que IN1 et OUT1 n'a que très peu d'impact sur les bilans, car ces termes sont en général relativement faibles (Zhang et al., 2020). Notons aussi que le recyclage de nutriments liés aux adventices (qui peuvent aussi servir de nourriture au bétail), et à la chute des feuilles des arbres situés en champs n'a pas été pris en compte dans ce travail. Djaby (2010) a observé que la biomasse d'adventices représentait en moyenne 10 % de la masse des résidus. Cette valeur était de 13 % chez Schlecht (2006, cité dans Djaby, 2010). Il serait donc intéressant d'inclure cette biomasse dans les bilans d'autant plus qu'elle est généralement plus appréciée que les résidus (Lamers & Emhardt, 1995, cité dans Djaby, 2010). Néanmoins, il faudrait en savoir plus sur les pratiques de désherbage de la zone d'étude pour vérifier si ces valeurs s'appliquent ici aussi.

Dans ce travail, la durabilité du système est évaluée au regard des nutriments N et P, mais ce ne sont pas les seuls éléments importants (Alley & Vanlauwe, 2009). Les autres macro ou micronutriments peuvent aussi être limitants. Aussi, les bilans comparent des quantités de nutriments provenant de deux sources différentes : organiques et minérales. Ces deux sources ne fonctionnent pas de la même manière et sont complémentaires. D'un côté, les engrais minéraux apportent des nutriments absorbables directement par la plante, mais qui sont aussi plus sujets à diverses pertes. De l'autre, la matière organique va libérer les nutriments plus lentement en fonction des processus biologiques.

V Conclusion

La pratique de l'agroécologie requiert l'utilisation de MO (compost, fumier, résidus de culture, etc.) pour remplacer partiellement ou totalement les engrais minéraux et entretenir la qualité des sols. Dès lors, l'objectif général de ce mémoire était de quantifier les ressources organiques potentiellement valorisables, afin d'estimer si elles sont présentes en quantité suffisante.

L'étude s'est concentrée sur un seul village, afin de développer une méthodologie reproductible pour les autres villages du Bénin et du Burkina Faso. L'analyse s'est d'abord appuyée sur l'utilisation d'images satellites afin de produire une cartographie de l'occupation du sol du village. Ensuite, différents scénarios de gestion de la fertilité ont été développés et leur durabilité a été évaluée à l'aide de bilan de nutriment. Ceux-ci utilisent la cartographie du terroir, les enquêtes et les échantillonnages comme principales sources de données.

Les résultats de la cartographie de l'occupation du sol, réalisée à 0.5 m grâce aux images Pléiades, sont mitigés. Le niveau 3 (10 classes) possède une OA moyenne (58 %) et souffre de problèmes principalement pour le maïs, le coton et le riz (F-score < 0.5). Une réflexion a donc eu lieu pour l'étude des autres villages. Une solution serait d'utiliser la méthode de classification par objet, afin de s'affranchir de l'hétérogénéité due à la très haute résolution spatiale des images Pléiades. Si la distinction entre chaque type de culture est abandonnée, on pourrait se baser sur de récentes cartographies globales de l'occupation du sol à 10 et 30 m. La *WorldCover* à 10 m de l'ESA, réalisée en 2020, semble la plus appropriée. L'utilisation des données d'enquête serait alors utile afin de pouvoir estimer la superficie occupée par chaque type de culture. Cette méthode permettrait de diminuer fortement la charge de travail tout en conservant une exactitude au moins similaire.

Pour les bilans de nutriments, le premier scénario montre un bilan plutôt positif globalement, mais il ne tient pas compte des pratiques de gestion des résidus. Une bonne partie d'entre eux sont mangés ou brûlés. Le second scénario, qui tient compte des pertes par le bétail, affiche un bilan négatif. Pour l'équilibrer, il faudrait (1) maximiser le retour des déjections du bétail sur les champs, en utilisant des techniques comme le parcase ou en récoltant les déjections laissées à l'endroit où les animaux dorment ; (2) limiter les pertes de nutriments, en veillant à ce que les agriculteurs ne brûlent pas les résidus et les incorporent plutôt dans le sol ; (3) compenser le déficit restant avec une fertilisation minérale raisonnée. La dose nécessaire pour équilibrer le bilan sera alors peut-être plus faible que la pratique actuelle, mais elle devrait être appliquée par l'ensemble des agriculteurs. Finalement, le scénario 3, qui vise à supprimer la fertilisation minérale, ne semble pas réaliste dans ce contexte d'ASS. La surface de savane nécessaire et le taux de récupération des déjections que cela exigerait seraient trop importants.

Pour limiter l'incertitude et affiner les bilans, plusieurs options sont envisageables. Tout d'abord, les valeurs moyennes de rendement et de doses de fertilisant pour certaines cultures ont été calculées sur base d'un faible nombre d'observations. Ces moyennes ne tiennent donc pas compte de certains facteurs qui pourraient exercer une influence. L'analyse statistique des données d'enquête de 2020 pourrait être utile pour augmenter le nombre d'observations. Ensuite, l'erreur liée au caractère déclaratif des mesures pourrait être évaluée en calibrant les dires des agriculteurs à l'aide de mesures de terrain. Enfin, il est nécessaire de préciser l'estimation de la biomasse disponible comme fourrage pour le bétail. Pour se faire, différentes pistes sont possibles : l'acquisition de mesures de biomasse supplémentaires, l'utilisation d'autres méthodes de télédétection, ou encore l'utilisation de relations empiriques entre la biomasse fourragère et d'autres variables facilement mesurables.

En plus des éléments cités dans les différents scénarios, d'autres pratiques existent pour augmenter la MO disponible à l'échelle des villages. Par exemple, l'augmentation de la part des légumineuses permet de limiter la quantité de fertilisant nécessaire tout en apportant des protéines importantes pour l'alimentation humaine. Il convient cependant de trouver des variétés avec un indice de récolte raisonnable pour favoriser l'apport de MO au sol grâce aux résidus. Les arbres légumineux sont aussi intéressants (Akinnifesi et al., 2010). Ils permettent de capter l'azote de l'air et de recycler les nutriments puisés en profondeur, qu'ils restituent au sol par la chute des feuilles.

Le bétail joue un rôle important dans la fertilisation et les agriculteurs qui n'en possèdent pas peuvent se retrouver défavorisés. Lors des enquêtes, les agriculteurs expliquaient qu'ils n'achetaient plus d'animaux, car ceux-ci meurent à cause de maladies. La mise en place de formations ou de systèmes de conseils vétérinaires serait donc une piste intéressante pour augmenter indirectement la quantité de fumier disponible. Selon Kindomihou et al. (2007), la réalisation d'un plan de fumure satisfaisant nécessiterait au maximum 1.5 bovin par ha cultivé (pour la majorité des exploitations en zone soudanienne du Bénin).

Les déjections humaines sont aussi des éléments riches en nutriments et disponibles même à petite échelle. Le défi réside dans la collecte des déjections, qui est à la fois un problème technique et social. À ce titre, l'initiative PeePeople a été lancée au Kenya en 2016. L'ONG distribue des sacs en plastique biodégradables qui servent à collecter les déjections. Les sacs peuvent être laissés dans les champs tels quels. Avec cette technique, le risque pathogène est limité et en moyenne 2.8, 0.4 et 0.5 kg de N, P et K peuvent être collectés par personne et par an (Peepoople, 2022).

Des solutions existent donc pour répondre à la demande en MO. Une étude sociotechnique est maintenant nécessaire pour comprendre d'une part comment appliquer ces solutions sur le terrain et comment les adapter aux contextes locaux, et d'autre part comprendre pourquoi elles ne sont pas adoptées par les agriculteurs si elles ont déjà été

proposées. Au Burkina Faso, van Caloen & Dagneau de Richecour (2015) ont montré qu'il n'existait pas de filière agroécologique pour mettre en avant ces pratiques. Pourtant, les auteurs affirment que les consommateurs seraient demandeurs de produits issus de l'agroécologie. Au Bénin, nous n'avons pas connaissance d'une telle filière non plus. Une étude similaire permettrait de savoir si les consommateurs sont demandeurs et si ce label inciterait les producteurs à adopter ces pratiques. Si de telles études sont concluantes, un soutien financier et technique sera aussi nécessaire pour mettre en place des formations ciblées pour les agriculteurs. Malheureusement, ces pratiques semblent en contradiction avec les subsides actuellement fournis par l'état, qui incitent les agriculteurs à appliquer des doses d'engrais trop élevées par rapport à l'état de dégradation de leur sol (Honfoga, 2018).

Finalement, il ne faut pas oublier que les agriculteurs ont une compréhension profonde de leur terroir. Il est important de communiquer avec eux le résultat de ce genre d'études pour identifier les problèmes et réfléchir ensemble aux solutions (Osbahr & Allen 2003, cité dans Schlecht & Hiernaux, 2004).

VI Références bibliographiques

- Abdi, A. M. (2020). Land cover and land use classification performance of machine learning algorithms in a boreal landscape using Sentinel-2 data. *GIScience & Remote Sensing*, 57(1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/15481603.2019.1650447>
- Agbanou, B. T. (2018). *Dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé (nord-ouest bénin) : De l'analyse diachronique à une modélisation prospective* [Phdthesis, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II ; Université d'Abomey-Calavi (Bénin)]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02476241>
- Agegn, A., Bitew, Y., & Ayalew, D. (2022). Response of yield and quality of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] varieties to blended NPSZnB fertilizer rates in Northwestern Ethiopia. *Heliyon*, 8(5), e09499. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09499>
- Agonyissa, D., & Sinsin, B. A. (1998). Productivité et capacité de charge des pâturages naturels au Bénin. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 51(3), 239-246. <https://doi.org/10.19182/remvt.9628>
- Aguinis, H., Gottfredson, R. K., & Joo, H. (2013). Best-Practice Recommendations for Defining, Identifying, and Handling Outliers. *Organizational Research Methods*, 16(2), 270-301. <https://doi.org/10.1177/1094428112470848>
- Airbus Defence and Space Intelligence. (2012). *Pléiades Imagery – User Guide*. <https://www.intelligence-airbusds.com/automne/api/docs/v1.0/document/download/ZG9jdXRoZXF1ZS1kb2N1bWVudC01NTY0Mw==/ZG9jdXRoZXF1ZS1maWxlLTU1NjQy/airbus-pleiades-imagery-user-guide-15042021.pdf>
- Akinnifesi, F. K., Ajayi, O. C., Sileshi, G., Chirwa, P. W., & Chianu, J. (2010). Fertiliser trees for sustainable food security in the maize-based production systems of East and Southern Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), 615-629. <https://doi.org/10.1051/agro/2009058>
- Akondé, T., & Igué, A. (2013). Effets de différents modes de gestion des résidus de soja sur le rendement du maïs dans deux zones agroécologiques du Centre-Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)*, 34-38.
- Alastaire, A., & Yagbedo, U. (2018). *Analyse d'offre des produits maraîchers au Bénin*. Université d'Abomey-Calavi & Chaire OMC. <http://www.wtochairs.org/benin/research/analyse-d-offre-des-produits-mara-chers-au-b-nin>
- Alley, M., & Vanlauwe, B. (2009). *The Role of Fertilizers in Integrated Plant Nutrient Management*.
- Altieri, M. A. (1995). *Agroecology : The Science of Sustainable Agriculture*. Westview Press.
- Ansah, T., Dogbe, W., Cudjoe, S., Iddrisu, A. R. A.-B., & Eseoghene, A. S. (2017). Agronomic performance of five rice varieties and nutritive value of the straw from these varieties. *West African Journal of Applied Ecology*, 25(1), 1-10. <https://doi.org/10.4314/wajae.v25i1>
- Applisat. (s. d.). *Comment choisir son image satellitaire ?* Applisat. Consulté 12 mai 2022, à l'adresse <https://www.applisat.fr/generalites-satellites/choisir-image-satellitaire>
- ARES. (s. d.). *AGRO-ECO*. Consulté 22 mai 2022, à l'adresse <https://www.ares-ac.be/fr/cooperation-au-developpement/pays-projets/projets-dans-le-monde/item/178-prd-amplification-de-la-transition-agro-ecologique-pour-des-systemes-de-productions-cerealieres-et-maraicheres-profitables-et-durables-dans-les-territoires-de-l-atacora-au-benin-et-du-houet-au-burkina-faso-agro-eco>
- Atzberger, C. (2013). Advances in Remote Sensing of Agriculture : Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs. *Remote Sensing*, 5(2), 949-981. <https://doi.org/10.3390/rs5020949>
- Ballouche, A. (2019). Ordinaires, dégradés ou patrimoniaux ? *Projets de paysage*. *Revue scientifique sur la conception et l'aménagement de l'espace*, 21, Article 21. <https://journals.openedition.org/paysage/2062>
- Battude, M., Al Bitar, A., Morin, D., Cros, J., Huc, M., Marais Sicre, C., Le Dantec, V., & Demarez, V. (2016). Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 184, 668-681. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.030>
- Becerril, J. (2013). Agrodiversidad y nutrición en Yucatán : Una mirada al mundo maya rural. *Región y sociedad*, 25(58), 123-163. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1870-39252013000300005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing : A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>

- Belspo. (s. d.). *Les Indices*. Belgian Platform on Earth Observation. Consulté 15 mai 2022, à l'adresse <https://eo.belspo.be/fr/les-indices>
- Belspo. (2003, novembre 24). *Résolution spectrale* [Text]. Belgian Platform on Earth Observation. <https://eo.belspo.be/fr/actualites/resolution-spectrale>
- Belspo. (2018, novembre 30). *Le spectre électromagnétique* [Text]. Belgian Platform on Earth Observation. <https://eo.belspo.be/fr/le-spectre-electromagnetique>
- Bernard, B., & Lux, A. (2017). How to feed the world sustainably : An overview of the discourse on agroecology and sustainable intensification. *Regional Environmental Change*, 17(5), 1279-1290. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1027-y>
- Bezner Kerr, R., Madsen, S., Stüber, M., Liebert, J., Enloe, S., Borghino, N., Parros, P., Mutyambai, D. M., Prudhon, M., & Wezel, A. (2021). Can agroecology improve food security and nutrition? A review. *Global Food Security*, 29, 100540. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100540>
- Bielders, C. (2015). Soil status, processes and trends. In *Intergovernmental Technical Panel on Soils* (p. 132- 137). FAO. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873%E2%80%90efc3%E2%80%9041db%E2%80%90b7d3%E2%80%902081a10ede50/>
- Billen, G., Aguilera, E., Einarsson, R., Garnier, J., Gingrich, S., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Le Noë, J., & Sanz-Cobena, A. (2021). Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle : The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. *One Earth*, 4(6), 839-850. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.008>
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>
- Bogo, A. G. S. O., AROUNA, O., IMOROU, I. T., OLOUKOI, J., & THOMAS, O. (2017). *Cartographie de la variabilité spatio-temporelle de la biomasse végétale dans la commune de Banikoara au Bénin*. 2. http://revues-ufhb-ci.org/fichiers/FICHIR_ARTICLE_2542.pdf
- Bouwman, A. F., Beusen, A. H. W., Lassaletta, L., van Apeldoorn, D. F., van Grinsven, H. J. M., Zhang, J., & Ittersum van, M. K. (2017). Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. *Scientific Reports*, 7(1), 40366. <https://doi.org/10.1038/srep40366>
- Brandt, M., Tucker, C. J., Kariryaa, A., Rasmussen, K., Abel, C., Small, J., Chave, J., Rasmussen, L. V., Hiernaux, P., Diouf, A. A., Kergoat, L., Mertz, O., Igel, C., Gieseke, F., Schöning, J., Li, S., Melocik, K., Meyer, J., Sinno, S., ... Fensholt, R. (2020). An unexpectedly large count of trees in the West African Sahara and Sahel. *Nature*, 587(7832), 78-82. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2824-5>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Brennan, J. R., Johnson, P. S., & Hanan, N. P. (2020). Comparing stability in random forest models to map Northern Great Plains plant communities in pastures occupied by prairie dogs using Pleiades imagery. *Biogeosciences*, 17(5), 1281-1292. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1281-2020>
- Brown, P. H., Zhao, F.-J., & Dobermann, A. (2021). What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05171-w>
- CBTF. (2008). *Organic Agriculture and Food Security in Africa*. UNEP-UNCTAD Capacity-building Task Force on Trade, Environment and Development.
- Center for Agriculture, Food, and the Environment. (2015, mars 6). *Fertilizer Calculations for Greenhouse Crops* [Text]. University of Massachusetts Amherst. <https://ag.umass.edu/greenhouse-floriculture/factsheets/fertilizer-calculations-for-greenhouse-crops>
- Chabi, F., Dagbenonbakin, G., Agbangba, E., Oussou, C. T. B., Agban Kesse, B., Dakpo, M., Ahoton, L., Amadji, G., & Aliou, S. (2021). Journal of Soil Science and Environmental Management Fertilizer recommendations for optimal soybean production in North and Center Benin. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 12, 29-43. <https://doi.org/10.5897/JSSEM2021.0860>
- Champagne, C. (2019). *Detecting crop damage using Sentinel-2 imagery in a smallholder agriculture landscape* [UCL - Université Catholique de Louvain]. <https://dial.uclouvain.be/memoire/ucl/object/thesis:22451>
- Chan, J. C.-W., & Paelinckx, D. (2008). Evaluation of Random Forest and Adaboost tree-based ensemble classification and spectral band selection for ecotope mapping using airborne hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 2999-3011. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.011>
- Chappell, M. J., & LaValle, L. A. (2011). Food security and biodiversity : Can we have both? An agroecological analysis. *Agriculture and Human Values*, 28(1), 3-26. <https://doi.org/10.1007/s10460-009-9251-4>
- Chappell, M. J., Vandermeer, J., Badgley, C., & Perfecto, I. (2009). Wildlife-friendly farming vs land sparing. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(4), 183-184.

- Chianu, J. N., Chianu, J. N., & Mairura, F. (2012). Mineral fertilizers in the farming systems of sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2), 545-566. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0050-0>
- Cichota, R., & Snow, V. O. (2009). Estimating nutrient loss to waterways—An overview of models of relevance to New Zealand pastoral farms. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(3), 239-260. <https://doi.org/10.1080/00288230909510509>
- Compere Leroy, E., & Cornu, M.-A. (2021). *Ouvrir un débat sur la valorisation des systèmes d'intégration culture-élevage comme leviers pour une gestion durable des flux d'azote en Région wallonne* [UCL - Université Catholique de Louvain]. <http://hdl.handle.net.proxy.bib.ucl.ac.be/2078.1/thesis:30406>
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin : A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Copernicus. (s. d.). *Copernicus en bref*. Consulté 3 mai 2022, à l'adresse <https://www.copernicus.eu/fr/propos-de-copernicus/copernicus-en-bref>
- Côte, F.-X., Poirier-Magona, E., Perret, S., Roudier, P., Rapidel, B., Thirion, M.-C., AFD, & CIRAD. (2019). *The agroecological transition of agricultural systems in the Global South*. éditions Quae.
- Dadrass Javan, F., Samadzadegan, F., Mehravar, S., Toosi, A., Khatami, R., & Stein, A. (2021). A review of image fusion techniques for pan-sharpening of high-resolution satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171, 101-117. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.001>
- Daget, P., & Poissonet, J. (2010). *Méthodes d'étude de terrain et Interprétations*.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougin, E., Grippa, M., & Tucker, C. J. (2014). Re-greening Sahel : 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment*, 140, 350-364. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.011>
- De Schutter, O. (2010). *Report: Agroecology and the right to food*. <http://www.srfood.org/en/report-agroecology-and-the-right-to-food>
- Delhez, B. (2019). *Tropical forest type mapping by remote sensing using C-Sar and optical data from sentinel-1 and -2*. <https://dial.uclouvain.be/memoire/ucl/object/thesis:22440>
- Dembélé, I., Koné, D., Soumaré, A., Coulibaly, D., Koné, Y., Ly, B., & Kater, L. (2000). Fallows and field systems in dryland Mali. In *Nutrient on the move* (International Institute for Environment and Development).
- Diarisso, T. (2015). *Analyse des flux de biomasse et des transferts de la fertilité à l'échelle du territoire villageois en Afrique sub-sahélienne : Opportunités d'intégration fonctionnelle agriculture-élevage* [PhD Thesis, Montpellier SupAgro]. https://agritrop.cirad.fr/578768/1/Tidiane%20Diarisso_these_2015.pdf
- Diouf, A. A. (2016). *Assessment of fodder biomass in Senegalese rangelands using earth observation and field data*. ULiège.
- Djaby, B. (2010). *Modélisation spatiale des flux organiques et minéraux assurant la productivité durable des systèmes culture-élevage dans le sahel nigérien*. Université de Liège.
- Djenontin, A. J. P., Houinato, M., Toutain, B., & Sinsin, B. (2009, décembre). Pratiques et stratégies des éleveurs face à la réduction de l'offre fourragère au Nord-Est du Bénin. *Sécheresse*, 20(4), 346-353. <https://bec.uac.bj/uploads/publication/1f5ca7e8e7d0a3f34f42696cd3787d89.pdf>
- Djenontin, J. A., Wennink, B., Dagbenongbakin, G., & Ouinkoun, G. (2003). *Pratiques de gestion de fertilité dans les exploitations agricoles du Nord- Bénin* (J.-Y. Jamin, L. S. Boukar, & C. Floret, Éd.s; p. 9 p.). Cirad - Prasac. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00133343>
- Djenontin, J., Dagbenonbakin, G., Igué, A., & Mensah, G. (2011). *FICHE TECHNIQUE : Gestion de la matière organique du sol : valorisation des résidus de récolte de l'exploitation agricole par le parage rotatif direct au Nord du Bénin*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2914.9525>
- Dorigo, W., Lucieer, A., Podobnikar, T., & Čarni, A. (2012). Mapping invasive Fallopia japonica by combined spectral, spatial, and temporal analysis of digital orthophotos. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.05.004>
- DSA-Bénin, D. de la S. A. (2021). *Recensement National de l'Agriculture 2019* (volume 2, principaux résultats du module de base). <https://instad.bj/statistiques/statistiques-economiques/124-les-statistiques-agricoles#autres>
- Duivenbooden, N. van, & Beek, C. L. van. (2015). *MonQi : Toolbox for monitoring and evaluating the management and performance of smallholder farms*. <https://research.wur.nl/en/publications/monqi-toolbox-for-monitoring-and-evaluating-the-management-and-pe>
- Dupuy, S., Gaetano, R., & Le Mézo, L. (2020). Mapping land cover on Reunion Island in 2017 using satellite imagery and geospatial ground data. *Data in Brief*, 28, 104934. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104934>

- EDF, (2020). *N-Visible / N-balance framework implementation guide*. <https://www.edf.org/sites/default/files/documents/N-Visible-N-balance-framework-implementation-guide.pdf>
- ESA. (2009a, décembre 7). *Eduspace—Histoire de l’observation de la Terre*. European Space Agency. https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_FR/SEMUX1S7NWF_0.html
- ESA. (2009b, décembre 9). *Eduspace—Qu’est-ce que la télédétection ?* European Space Agency. https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_FR/SEMP4O1POWF_0.html
- ESA. (2015). *Sentinel-2 User Handbook*. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.pdf/8869acdf-fd84-43ec-ae8c-3e80a436a16c?t=1438278087000
- ESA. (2017). *Land Cover CCI Product User Guide Version 2*. https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf
- ESA, UCLouvain, Bontemps, S., Defourny, P., Van Bogaert, E., Arino, O., Kalogirou, V., & Ramos Perez, J. R. (2011). *GLOBCOVER 2009 : Products Description and Validation Report*. http://due.esrin.esa.int/files/GLOBCOVER2009_Validation_Report_2.2.pdf
- Escadafal, R., & Huete, A. (1991). Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l’amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 1385-1391.
- Fan, J., Zhang, X., Qin, Z., De Vroey, M., & Defourny, P. (2021). Evaluation of Crop Type Classification with Different High Resolution Satellite Data Sources. *Remote Sensing*, 13, 911. <https://doi.org/10.3390/rs13050911>
- FAO. (1996). *World Food Summit—Final Report*. <https://www.fao.org/3/w3548e/w3548e00.htm>
- FAO. (1997). *Agriculture food and nutrition for Africa—A resource book for teachers of agriculture* (Publishing Management Group, FAO). <https://www.fao.org/3/w0078e/w0078e05.htm>
- FAO. (1998). Chapter 8—ETc under soil water stress conditions. In *Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56*. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e0e.htm#TopOfPage>
- FAO. (2011). *The State of Food and Agriculture 2010-2011 : WOMEN IN AGRICULTURE - Closing the gender gap for development* (p. 160). <https://www.fao.org/3/i2050e/i2050e00.htm>
- FAO. (2012). *National Forest Monitoring and Assessment – Manual for integrated field data collection* (Version 3.0; National Forest Monitoring and Assessment Working Paper NFMA 37/E).
- FAO. (2018a). *FAO’s work on agroecology : A pathway to achieving the SDGs*.
- FAO. (2018b). *Initiative de passage à l’échelle supérieure de l’agroécologie*. <https://www.fao.org/3/I9049FR/i9049fr.pdf>
- FAO. (2018c). *Les 10 éléments de l’agroécologie : Guider la transition vers des systèmes alimentaires et agricoles durables*. FAO. <https://www.fao.org/publications/card/en/c/I9037FR>
- FAO. (2019). *L’État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2019 : Se prémunir contre les ralentissements et les fléchissements économiques*. FAO. <https://doi.org/10.4060/CA5162FR>
- FAO. (2020). *Emissions due to agriculture. Global, regional and country trends 2000–2018*. (N° 18; FAOSTAT Analytical Brief Series, p. 14).
- FAO, F. (2022). *L’État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2022 : Réorienter les politiques alimentaires et agricoles pour rendre l’alimentation saine plus abordable*. FAO, IFAD, WHO, WFP, UNICEF,. <https://doi.org/10.4060/cc0640fr>
- FAOSTAT. (2022). *FAOSTAT | Crops and livestock products*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Fasbender, D., Radoux, J., & Bogaert, P. (2008). Bayesian Data Fusion for Adaptable Image Pansharpening. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(6), 1847-1857. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.917131>
- Fermont, A., & Benson, T. (2011). Estimating yield of food crops grown by smallholder farmers : A review in the Uganda context. *International Food Policy Research Institute discussion paper*, 01097.
- Fischer, J., Brosi, B., Daily, G. C., Ehrlich, P. R., Goldman, R., Goldstein, J., Lindenmayer, D. B., Manning, A. D., Mooney, H. A., Pejchar, L., Ranganathan, J., & Tallis, H. (2008). Should agricultural policies encourage land sparing or wildlife-friendly farming? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(7), 380-385. <https://doi.org/10.1890/070019>
- Frampton, W. J., Dash, J., Watmough, G., & Milton, E. J. (2013). Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>
- Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T. A., Creamer, N., Harwood, R., Salomonsson, L., Helenius, J., Rickerl, D., Salvador, R., Wiedenhoft, M., Simmons, S., Allen, P., Altieri, M., Flora, C., & Poincelot, R.

- (2003). Agroecology : The Ecology of Food Systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 22(3), 99-118. https://doi.org/10.1300/J064v22n03_10
- Franklin, J., & Hiernaux, P. H. Y. (1991). Estimating foliage and woody biomass in Sahelian and Sudanian woodlands using a remote sensing model. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), 1387-1404. <https://doi.org/10.1080/01431169108929732>
- Garner, E., & de la O Campos, A. P. (2014). *Identifying the “family farm” : An informal discussion of the concepts and definitions* [ESA Working Paper No. 14-10]. FAO. <https://www.fao.org/3/i4306e/i4306e.pdf>
- Garrity, D. P., Akinnifesi, F., Ajayi, O. O., Sileshi, G., Mowo, J., Antoine, K., Mahamane, L., & Bayala, J. (2010). Evergreen Agriculture : A robust approach to sustainable food security in Africa. *Food Security*, 2, 197-214. <https://doi.org/10.1007/s12571-010-0070-7>
- Ghassemian, H. (2016). A review of remote sensing image fusion methods. *Information Fusion*, 32, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.03.003>
- Giller, K. E., Witter, E., Corbeels, M., & Tittonell, P. (2009). Conservation agriculture and smallholder farming in Africa : The heretics’ view. *Field Crops Research*, 114(1), 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017>
- Gislason, P. O., Benediktsson, J. A., & Sveinsson, J. R. (2006). Random Forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, 27(4), 294-300. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.08.011>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289-298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gliessman, S. R. (2014). *Agroecology : The ecology of sustainable food systems*. CRC press.
- Goffart, D., Curnel, Y., Planchon, V., Goffart, J.-P., & Defourny, P. (2021). Field-scale assessment of Belgian winter cover crops biomass based on Sentinel-2 data. *European Journal of Agronomy*, 126, 126278. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126278>
- Gollin, D. (2014). *Smallholder agriculture in Africa : An overview and implications for policy* [IIED Working Paper]. IIED. <https://pubs.iied.org/14640iied>
- Gonzales, C., Jain-Chandra, S., Kochhar, K., Newiak, M., & Zeinullayev, T. (2015). *Catalyst for Change : Empowering Women and Tackling Income Inequality* (p. 42) [IMF Staff Discussion Note]. INTERNATIONAL MONETARY FUND. <https://www.imf.org/external/pubs/ft/sdn/2015/sdn1520.pdf>
- Grossman, D. (1982). Primary production of rangeland practical and interpretive problems. *Proceedings of the Annual Congresses of the Grassland Society of Southern Africa*, 17(1), 76-78. <https://doi.org/10.1080/00725560.1982.9648960>
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). *Global food losses and food waste*. FAO Rome.
- Hamimeche, M., Niculescu, S., Billey, A., & Moulai, R. (2021). Identification and mapping of Algerian island vegetation using high-resolution images (Pléiades and SPOT 6/7) and random forest modeling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(9), 617. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09429-9>
- Haralick, R. M., Shanmugam, K., & Dinstein, I. (1973). Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(6), 610-621. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>
- Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R., Valentini, R., Bernoux, M., & Saint-Andre, L. (2011). Estimating Tree Biomass of Sub-Saharan African Forests : A Review of Available Allometric Equations. *Silva Fennica*, 45(3B). <https://doi.org/10.14214/sf.38>
- Hiernaux, P., Ayantunde, A., Kalilou, A., Mougin, E., Gérard, B., Baup, F., Grippa, M., & Djaby, B. (2009). Trends in productivity of crops, fallow and rangelands in Southwest Niger : Impact of land use, management and variable rainfall. *Journal of Hydrology*, 375(1), 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.032>
- HLPE. (2019). *HLPE 14 : Approches agroécologiques et autres approches novatrices pour une agriculture et des systèmes alimentaires durables propres à améliorer la sécurité alimentaire et la nutrition*. <http://www.fao.org/agroecology/database/detail/fr/c/1242143/>
- Holt-Giménez, E. (2002). Measuring farmers’ agroecological resistance after Hurricane Mitch in Nicaragua : A case study in participatory, sustainable land management impact monitoring. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93(1), 87-105. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00006-3)
- Honfoga, B. (2018). Diagnosing soil degradation and fertilizer use relationship for sustainable cotton production in Benin. *Cogent Environmental Science*, 4. <https://doi.org/10.1080/23311843.2017.1422366>
- IAASTD. (2009). *Synthesis report : A synthesis of the global and sub-global IAASTD reports*. International Assessment of Agricultural Knowledge, Science, and Technology for Development.
- IDB. (s. d.). *Index DataBase*. A database for remote sensing indices. Consulté 15 mai 2022, à l’adresse <https://www.indexdatabase.de/>

- IFA, (2016). *Fertilizers and their Efficient Use*. https://www.fertilizer.org/public/resources/publication_detail.aspx?SEQN=5221&PUBKEY=811C52B7-F679-472A-B955-3AD6AD18F17D
- Infoclimat. (2021). *Climatologie de l'année 2021 à Natitingou*. <https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2021/natitingou/valeurs/65319.html>
- INSAE. (2016). *Benin Data Portal*. <https://benin.opendataforafrica.org/data/#region=BJ-AK&menu=topic>
- INSAE, (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique). (2018). *BENIN - Troisième édition de l'Analyse Globale de la Vulnérabilité et de la Sécurité Alimentaire (2017)* (BEN-INSAE-AGVSA-2017-001; Analyse Globale de la Vulnérabilité et de la Sécurité Alimentaire, p. 171). <https://nada.insae.bj/index.php/catalog/29>
- IPBES. (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services* (summary for policy makers). Intergovernmental Science-Policy Platform On Biodiversity And Ecosystem Services. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3553579>
- IPCC. (2019a). *Summary for Policymakers* (Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems.). Intergovernmental Panel on Climate Change. [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- IPCC. (2019b). *Technical Summary* (Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems.). Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In Press.
- IPCC. (2021). *Summary for Policymakers* (Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.). [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.
- IPCC. (2022a). *Summary for Policymakers* (Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.). [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In Press.
- IPCC. (2022b). *Summary for Policymakers* (Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.). [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (eds.)]. In Press.
- Jacques, D. C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougin, E., & Defourny, P. (2014). Monitoring dry vegetation masses in semi-arid areas with MODIS SWIR bands. *Remote Sensing of Environment*, 153, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.027>
- Jarlan, L., Mangiarotti, S., Mougin, E., Mazzega, P., Hiernaux, P., & Le Dantec, V. (2008). Assimilation of SPOT/VEGETATION NDVI data into a sahelian vegetation dynamics model. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1381-1394. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.02.041>
- Jenkinson, D. S. (2001). The impact of humans on the nitrogen cycle, with focus on temperate arable agriculture. *Plant and Soil*, 228(1), 3-15. <https://doi.org/10.1023/A:1004870606003>
- Jiang, L., Rich, W., & Buhl-Brown, D. (2015). Texture Analysis of Remote Sensing Imagery with Clustering and Bayesian Inference. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 7, 1-10. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2015.09.01>
- Jones, A., Breuning-Madsen, H., Dewitte, O., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, O., Gallali, T., Hallett, S., Jones, R., Kilasara, M., Le Roux, P., Micheli, Montanarella, Spaargaren, Thiombiano, Van, Ranst, Yemefack, & Zougmore. (2013). *Soil atlas of Africa*. European Commission, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/52319>
- Kante, S. (2001). *Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud*. Wageningen University.
- Karlson, M., Ostwald, M., Reese, H., Sanou, J., Tankoano, B., & Mattsson, E. (2015). Mapping Tree Canopy Cover and Aboveground Biomass in Sudano-Sahelian Woodlands Using Landsat 8 and Random Forest. *Remote Sensing*, 7(8), 10017-10041. <https://doi.org/10.3390/rs70810017>

- Kiage, L. M. (2013). Perspectives on the assumed causes of land degradation in the rangelands of Sub-Saharan Africa. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 37(5), 664-684. <https://doi.org/10.1177/0309133313492543>
- Kim, D.-G., Grieco, E., Bombelli, A., Hickman, J. E., & Sanz-Cobena, A. (2021). Challenges and opportunities for enhancing food security and greenhouse gas mitigation in smallholder farming in sub-Saharan Africa. A review. *Food Security*, 13(2), 457-476. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01149-9>
- Kindomihou, V., Karimou, J. M., Nelen, J., Kawa, R., Guero, Y., Banoin, M., & Sinsin, B. (2007). *Diversité, Caractérisation et Typologie opérationnelle des Exploitations Agricoles pour l'Amélioration des Pratiques de Gestion de la Fertilité des Sols en Zone Soudanienne du Bénin*.
- Kombienou, P. D., Arouna, O., & Toko, I. I. (2022). Modelling the dynamics of land cover by 2050 in the north-western Atacora (Benin, West Africa). *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 19(1), 100-121.
- Kombienou, P. D., Dossa, A. B. K., & Sinsin, B. A. (2021). Dégradation physique des sols et la pression sur les ressources forestières dans le Nord-Ouest de l'Atacora au Bénin. *Afrique SCIENCE*, 2, 171-190.
- Kormawa, P., Munyemana, A., & Soule, B. (2003). Fertilizer market reforms and factors influencing fertilizer use by small-scale farmers in Bénin. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 100(2), 129-136. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00181-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00181-6)
- Kotir, J. H. (2011). Climate change and variability in Sub-Saharan Africa : A review of current and future trends and impacts on agriculture and food security. *Environment, Development and Sustainability*, 13(3), 587-605. <https://doi.org/10.1007/s10668-010-9278-0>
- Krisnawati, A., & Adie, M. M. (2015). Variability of Biomass and Harvest Index from Several Soybean Genotypes as Renewable Energy Source. *Energy Procedia*, 65, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.023>
- Kumar, S., Gautam, G., & Saha, S. K. (2015). Hyperspectral remote sensing data derived spectral indices in characterizing salt-affected soils : A case study of Indo-Gangetic plains of India. *Environmental Earth Sciences*, 73(7), 3299-3308. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3613-y>
- Lambert, M.-J. (2018). *Estimating and understanding smallholder crop production variability from pixel to village levels thanks to satellite observation in Mali* [UCL - Université Catholique de Louvain]. <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:207897>
- Larousse, É. (s. d.). *Définitions : Nutriment - Dictionnaire de français Larousse*. Consulté 28 mai 2022, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/nutriment/55297>
- Le Houérou, H. N. (1980). *Les fourrages ligneux en Afrique*. ILRI (aka ILCA and ILRAD).
- Lebourgeois, V., Dupuy, S., Vintrou, É., Ameline, M., Butler, S., & Bégué, A. (2017). A Combined Random Forest and OBIA Classification Scheme for Mapping Smallholder Agriculture at Different Nomenclature Levels Using Multisource Data (Simulated Sentinel-2 Time Series, VHRS and DEM). *Remote Sensing*, 9(3), 259. <https://doi.org/10.3390/rs9030259>
- Leeuw, P. N. de. (1997). Crop residues in Tropical Africa : Trends in supply, demand and use. *Crop Residues in Sustainable Mixed Crop/Livestock Farming Systems.*, 41-77. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19971810479>
- Leippert, F., Darmaun, M., Bernoux, M., Mpheshea, M., with contribution, by, Müller, A., Geck, M., Herren, M., Irungu, W., Nyasimi, M., Sene, J. M., Sow, M., Sylla, I., & Termote, C. (2020). *The potential of agroecology to build climate-resilient livelihoods and food systems* (FAO, Éd.). Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO and Biovision. <https://doi.org/10.4060/cb0438en>
- Liu, H., Jiang, G. M., Zhuang, H. Y., & Wang, K. J. (2008). Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China : With special references of crop residues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1402-1418. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.011>
- Livingston, G., Schonberger, S., & Delaney, S. (2011). *Sub-Saharan Africa : The state of smallholders in agriculture* (p. 36) [Paper presented at the IFAD Conference on New Directions for Smallholder Agriculture]. IFAD. <https://docs.igihe.com/IMG/pdf/untitled-3.pdf>
- Loison, R., Audebert, A., Chopart, J.-L., Debaeke, P., Dessauw, D., Gourlot, J.-P., Gozé, E., Jean, J., & Gérardaux, E. (2017). SIXTY YEARS OF BREEDING IN CAMEROON IMPROVED FIBRE BUT NOT SEED COTTON YIELD. *Experimental Agriculture*, 53(2), 202-209. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000302>
- Lowder, S. K., Sánchez, M. V., & Bertini, R. (Éds.). (2019). Farms, family farms, farmland distribution and farm labour : What do we know today? *ESA Working Paper*. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.301283>
- Lowder, S. K., Skoet, J., & Raney, T. (2016). The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and Family Farms Worldwide. *World Development*, 87, 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.041>

- Manson, S., Bonsal, D., Kernik, M., & Lambin, E. (2015). Geographic Information Systems and Remote Sensing. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.91027-4>
- Marissiaux, Q. (2018). *Characterizing tropical forest dynamics by remote-sensing using very high resolution and Sentinel-2 images* [UCL - Université Catholique de Louvain]. <https://dial.uclouvain.be/memoire/ucl/en/object/thesis%3A17294>
- Mason, M. (2010). Sample Size and Saturation in PhD Studies Using Qualitative Interviews. *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.17169/fqs-11.3.1428>
- MENC & MAEP. (2019). *Stratégie nationale pour l'e-Agriculture au Bénin 2020-2024* (p. 57). Ministère de l'Économie Numérique et de la Communication (MENC). Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche (MAEP). <http://assets.fsnforum.fao.org.s3-eu-west-1.amazonaws.com/public/discussions/contributions/Strat%C3%A9gie%20nationale%20e-Agriculture%20Benin%2025-08-2019.pdf>
- Mercier, A., Betbeder, J., Rumiano, F., Baudry, J., Gond, V., Blanc, L., Bourgoin, C., Cornu, G., Ciudad, C., Marchamalo, M., Pocard-Chapuis, R., & Hubert-Moy, L. (2019). Evaluation of Sentinel-1 and 2 Time Series for Land Cover Classification of Forest–Agriculture Mosaics in Temperate and Tropical Landscapes. *Remote Sensing*, 11(8), 979. <https://doi.org/10.3390/rs11080979>
- Metternicht, G. (2003). Vegetation indices derived from high-resolution airborne videography for precision crop management. *International Journal of Remote Sensing*, 24(14), 2855-2877. <https://doi.org/10.1080/01431160210163074>
- Middendorf, B. J., Pierzynski, G. M., Stewart, Z. P., & Prasad, P. V. V. (2017). *Sub-Saharan Africa Soil Fertility Prioritization Report : II. Summit Results* (II; p. 63). Feed the Future Innovation Lab for Collaborative Research on Sustainable Intensification, Kansas State University. <https://www.k-state.edu/siil/resources/soilfertility/index.html>
- Millard, K., & Richardson, M. (2015). On the Importance of Training Data Sample Selection in Random Forest Image Classification : A Case Study in Peatland Ecosystem Mapping. *Remote Sensing*, 7(7), 8489-8515. <https://doi.org/10.3390/rs70708489>
- Mousseau, F. (2015). *The Untold Success Story of Agroecology in Africa*. <https://link.springer.com/article/10.1057/s41301-016-0026-0>
- Mugwanya, N. (2019). Why agroecology is a dead end for Africa. *Outlook on Agriculture*, 48(2), 113-116. <https://doi.org/10.1177/0030727019854761>
- Nations Unies. (2019). *World Population Prospects 2019: Vol. Vol. II : Demographic Profiles (ST/ESA/SER.A/427)* (Department of Economic and Social Affairs Population Division). https://population.un.org/wpp/Graphs/1_Demographic%20Profiles/Sub-Saharan%20Africa.pdf
- N'Dri, B., Koné, A., Loukou, S., Barot, S., & Gignoux, J. (2018). Carbon and Nutrient Losses through Biomass Burning, and Links with Soil Fertility and Yam (*Dioscorea Alata*) Production. *Experimental Agriculture*, 55, 1-14. <https://doi.org/10.1017/s0014479718000327>
- Nicholls, C., & Altieri, M. (2016). Agroecology : Principles for the Conversion and Redesign of Farming Systems. *Journal of Ecosystem and Ecography*, 01. <https://doi.org/10.4172/2157-7625.S5-010>
- Niyonkuru, D. (2018). *Synthèse : Pour la dignité paysanne. Expériences et témoignages d'Afrique, réflexions, pistes méthodologiques*. <https://grip.org/pour-la-dignite-paysanne-experiences-et-temoignages-dafrique-reflexions-pistes-methodologiques/>
- Niyonkuru, D. (2019, décembre 4). *Pour une agriculture durable : L'Afrique se forge ses propres repères* [LouvainCooperation]. <https://www.youtube.com/watch?v=jBLOhkBZFS4>
- Olivier de Sardan, J.-P. (1995). La politique du terrain. *Enquête. Archives de la revue Enquête*, 1, 71-109. <https://doi.org/10.4000/enquete.263>
- Ouiminga, I. (2018). Profitability in a Sustainable Agricultural Production System : An Approach by the Soil and Water Conservation. In A. Shimeles, A. Verdier-Chouchane, & A. Boly (Éds.), *Building a Resilient and Sustainable Agriculture in Sub-Saharan Africa* (p. 123-145). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76222-7_7
- Ouranos, Oxfam, & Université d'Abomey-Calavi. (2020). *Atlas climatique du Bénin*. (p. 159). <https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/AtlasBenin.pdf>
- Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217-222. <https://doi.org/10.1080/01431160412331269698>
- Peepoople. (2022). *Peepoople | From Waste to Value*. <http://www.peepoople.com/peepoo/from-waste-to-value/#navigation>

- Peña-Barragán, J. M., Ngugi, M. K., Plant, R. E., & Six, J. (2011). Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. *Remote Sensing of Environment*, 115(6), 1301-1316. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.009>
- Peñuelas, J., John A Gamon, Kevin L Griffin, & Christopher B Field. (1993). Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 46(2), 110-118. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90088-F](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90088-F)
- Peoples, M. B., Giller, K. E., Jensen, E. S., & Herridge, D. F. (2021). Quantifying country-to-global scale nitrogen fixation for grain legumes : I. Reliance on nitrogen fixation of soybean, groundnut and pulses. *Plant and Soil*, 469(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05167-6>
- Pernechele, V., Fontes, F., Baborska, R., Nkuingoua, J., Pan, X., & Tuyishime, C. (2021). *Public expenditure on food and agriculture in sub-Saharan Africa—World*. FAO. <https://www.fao.org/3/cb4492en/cb4492en.pdf>
- Pierzynski, G. M., Stewart, Z. P., Prasad, P. V. V., & Middendorf, B. J. (2017). *Sub-Saharan Africa Soil Fertility Prioritization Report : I. Survey Results* (I; p. 29). Feed the Future Innovation Lab for Collaborative Research on Sustainable Intensification, Kansas State University. <https://www.k-state.edu/siil/resources/soilfertility/index.html>
- PNUD. (2022). *Evolution socio-économique au Bénin : Situation actuelle et perspectives*. <https://www.undp.org/fr/benin/publications/evolution-socio-%C3%A9conomique-au-b%C3%A9nin-situation-actuelle-et-perspectives>
- Ponisio, L. C., M'Gonigle, L. K., Mace, K. C., Palomino, J., de Valpine, P., & Kremen, C. (2015). Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1799), 20141396. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>
- Pontius, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa : Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407-4429. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>
- Poux, X., & Aubert, P.-M. (2018). Une Europe agroécologique en 2050 : Une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine. *Enseignements d'une modélisation du système alimentaire européen, Iddri-ASCA, Study N°09/18, Paris, France*.
- 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), 143-170. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(96\)00009-1](https://doi.org/10.1016/0308-521X(96)00009-1)
- Pretty, J., Noble, A., Bossio, D., Dixon, J., Bragg, R., Vries, F., & Morison, J. (2006). Resource-Conserving Agriculture Increases Yields in Developing Countries. *Environmental science & technology*, 40, 1114-1119. <https://doi.org/10.1021/es062733a>
- Pretty, J., Toulmin, C., & Williams, S. (2011). Sustainable intensification in African agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 9(1), 5-24. <https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0583>
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119-126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Rahimi, J., Ago, E., Ayantunde, A. A., Berger, S., Bogaert, J., Butterbach-Bahl, K., Cappelaere, B., Demarty, J., Diouf, A., Falk, U., Haas, E., Hiernaux, P., Kraus, D., Rouspard, O., Scheer, C., Srivastava, A., Tagesson, T., & Grote, R. (2021). *Modelling Gas Exchange and Biomass Production in West African Sahelian and Sudanian Ecological Zones*. <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-417>
- Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote sensing digital image analysis : An introduction* (4th ed). Springer.
- Rodriguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sanchez, J. P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>
- Rouse, J. W. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation* (NASA-CR-139243). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022555>
- Russell, F., & Gilmore, D. (2018). *Experiments in Soil Biology and Biochemistry*. Scientific e-Resources.
- Sakho-Jimbira, S., & Hathie, I. (2020). *The future of agriculture in Sub-Saharan Africa* (Policy brief N° 2; p. 18). Shouthern Voice, IFAD.
- Samandougou, Y., Compaore, H., Zoundi, S. J., & Zoungrana-Kabore, Y. C. (2019). Evaluation de la productivité des herbacées fourragères des forêts sacrées de Koupéla dans le Centre Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(1), 99. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i1.9>

- Sanon, H. O., Savadogo, M., Tamboura, H. H., & Kanwé, B. A. (2014). Caractérisation des systèmes de production et des ressources fourragères dans un terroir test de la zone soudanienne du Burkina Faso. *Vertigo*, Volume 14 Numéro 2. <https://doi.org/10.4000/vertigo.15171>
- Sapkota, T. B., Jat, M. L., Jat, R. K., Kapoor, P., & Stirling, C. (2016). Yield Estimation of Food and Non-food Crops in Smallholder Production Systems. In T. S. Rosenstock, M. C. Rufino, K. Butterbach-Bahl, L. Wollenberg, & M. Richards (Éds.), *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture* (p. 163-174). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29794-1_8
- Satellite Imaging Corp. (s. d.). *Satellite Sensors and Specifications*. Consulté 3 mai 2022, à l'adresse <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/>
- Savtchenko, A., Ouzounov, D., Ahmad, S., Acker, J., Leptoukh, G., Koziana, J., & Nickless, D. (2004). Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. *Advances in Space Research*, 34(4), 710-714. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.03.012>
- Schlecht, E., & Hiernaux, P. (2004). Beyond adding up inputs and outputs : Process assessment and upscaling in modelling nutrient flows. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70(3), 303-319. <https://doi.org/10.1007/s10705-004-0765-2>
- Scurlock. (2002). *Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements*. <https://userweb.weihenstephan.de/lattanzi/Lit/Scurlock%20et%20al%202002.pdf>
- Segnon, A. C., & Achigan-Dako, E. G. (2014). Comparative analysis of diversity and utilization of edible plants in arid and semi-arid areas in Benin. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(1), 80. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-80>
- Sharaunga, S., Mudhara, M., & Bogale, A. (2015). The Impact of 'Women's Empowerment in Agriculture' on Household Vulnerability to Food Insecurity in the KwaZulu-Natal Province. *Forum for Development Studies*, 42(2), 195-223. <https://doi.org/10.1080/08039410.2014.997792>
- Shimeles, A., Verdier-Chouchane, A., & Boly, A. (2018). Introduction : Understanding the Challenges of the Agricultural Sector in Sub-Saharan Africa. In A. Shimeles, A. Verdier-Chouchane, & A. Boly (Éds.), *Building a Resilient and Sustainable Agriculture in Sub-Saharan Africa* (p. 1-12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76222-7_1
- Sinsin, B. A. (1993). *Phytosociologie, écologie, valeur pastorale, production et capacité de charge des pâturages naturels du périmètre Nikki-Kalalé au Nord-Bénin (Unpublished doctoral dissertation)*. [Université libre de Bruxelles, Faculté des sciences]. <https://dipot.ulb.ac.be/dspace/bitstream/2013/212839/3/f4738f5f-ccb2-48c2-ab2a-232fc28f0582.txt>
- Sluiter, R., & Pebesma, E. J. (2010). Comparing techniques for vegetation classification using multi- and hyperspectral images and ancillary environmental data. *International Journal of Remote Sensing*, 31(23), 6143-6161. <https://doi.org/10.1080/01431160903401379>
- SOS Faim. (2015). *Les défis des éleveurs : Le cas du Bénin en Afrique de l'Ouest*. SOS Faim Luxembourg. <https://www.sosfaim.lu/publication/les-defis-des-eleveurs-le-cas-du-benin-en-afrique-de-louest/>
- Sounon, K. L. S. A., Ickowicz, A., Lesnoff, M., Messad, S., Valls, H., & Houinato, M. (2019). Impact de la sédentarisation des éleveurs sur la production bovine au nord du Bénin. *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*. <https://doi.org/10.19182/remvt.31778>
- Sounon, K. L. S. A., Lesse, P., Ickowicz, A., Messad, S., Houinato, M., & Mensah, G. A. (2019). Evolutions des systèmes d'élevage bovin au nord-ouest du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, 22-29. <https://agritrop.cirad.fr/594940/>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Stewart, Z. P., Pierzynski, G. M., Middendorf, B. J., & Prasad, P. V. V. (2017). *Sub-Saharan Africa Soil Fertility Prioritization Report : III. Combined Summary* (III; p. 16). Feed the Future Innovation Lab for Collaborative Research on Sustainable Intensification, Kansas State University. <https://www.k-state.edu/siil/resources/soilfertility/index.html>
- Sud, U., Ahmad, T., Gupta, V., Chandra, H., Sahoo, P., Aditya, K., Singh, M., & Biswas, A. (2017). *Methodology for Estimation of Crop Area and Crop Yield under Mixed and Continuous Cropping*. Technical Report Series : GO-21-2017, March 2017. Global Strategy, FAO, Rome Publication. (GO-21-2017). FAO.
- Tanaka, A., Saito, K., Azoma, K., & Kobayashi, K. (2013). Factors affecting variation in farm yields of irrigated lowland rice in southern-central Benin. *European Journal of Agronomy*, 44, 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.002>

- Tapsoba, K. P., Aoudji, A., Konkobo, M., Kestemont, M., Legay, C., & Achigan-Dako, E. (2020). Sociotechnical Context and Agroecological Transition for Smallholder Farms in Benin and Burkina Faso. *Agronomy*, *10*, 1-34. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091447>
- The pandas development team. (2022). *pandas-dev/pandas: Pandas 1.4.2 (v1.4.2)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3509134>
- The World Bank. (2019). *Sub-Saharan Africa | Data*. <https://data.worldbank.org/country/ZG>
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P. A., & Giller, K. E. (2005). Estimating yields of tropical maize genotypes from non-destructive, on-farm plant morphological measurements. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *105*(1), 213-220. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.04.002>
- Toomsan, B., McDonagh, J. F., Limpinuntana, V., & Giller, K. E. (1995). Nitrogen fixation by groundnut and soyabean and residual nitrogen benefits to rice in farmers' fields in Northeast Thailand. *Plant and Soil*, *175*(1), 45-56. <https://doi.org/10.1007/BF02413009>
- Tovihoudji, P. (2018). *Improving maize productivity in northern Benin through localized placement of amendments and fertilizers*.
- Tovihoudji, P., Akponikpe, I., Adjogboto, A., DJENONTIN, J., Agbossou, E., & Bielders, C. (2018). Combining hill-placed manure and mineral fertilizer enhances maize productivity and profitability in northern Benin. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *110*. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9872-8>
- Tscharntke, T., Clough, Y., Wanger, T. C., Jackson, L., Motzke, I., Perfecto, I., Vandermeer, J., & Whitbread, A. (2012). Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation*, *151*(1), 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.01.068>
- UCS. (2022, janvier 1). *Satellite Database*. Union of Concerned Scientists. <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>
- United Nations. (2019). *World population prospects 2019 (highlights)*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- University of Houston. (s. d.). *CHAPTER 6: Weathering and Soil*. Consulté 1 juin 2022, à l'adresse <https://uh.edu/~geos6g/1330/weath.html>
- Ustin, S. L. (2013). Remote sensing of canopy chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(3), 804-805. <https://doi.org/10.1073/pnas.1219393110>
- Valbuena, D., Tui, S. H.-K., Erenstein, O., Teufel, N., Duncan, A., Abdoulaye, T., Swain, B., Mekonnen, K., Germaine, I., & Gérard, B. (2015). Identifying determinants, pressures and trade-offs of crop residue use in mixed smallholder farms in Sub-Saharan Africa and South Asia. *Agricultural Systems*, *134*, 107-118. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.013>
- van Caloen, A., & Dagneau de Richécour, T. (2015). *Le maraîchage agroécologique comme réponse à l'insécurité alimentaire au Burkina Faso : Analyse et potentiel de création d'une filière commerciale*.
- Vancutsem, C., Marinho, E., Kayitakire, F., See, L., & Fritz, S. (2013). Harmonizing and Combining Existing Land Cover/Land Use Datasets for Cropland Area Monitoring at the African Continental Scale. *Remote Sensing*, *5*(1), 19-41. <https://doi.org/10.3390/rs5010019>
- Vanlauwe, B., & Giller, K. (2006). Popular myths around soil fertility management in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *116*(1-2), 34-46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.016>
- Verhegghen, A., Bontemps, S., & Defourny, P. (2014). A global NDVI and EVI reference data set for land-surface phenology using 13 years of daily SPOT-VEGETATION observations. *International Journal of Remote Sensing*, *35*(7), 2440-2471. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.883105>
- Via Campesina. (1996). *Food Sovereignty : A Future without Hunger*.
- Vlaming, J., & Heesmans, H. (2019). *MonQIt | Monitoring for Quality Improvement—Basic User Manual*. www.MonQIt.org
- Vlek, P. L. G., Le, Q. B., & Tamene, L. (2010). Assessment of Land Degradation, Its Possible Causes and Threat to Food Security in Sub-Saharan Africa. In *Food Security and Soil Quality* (Rattan Lal, B A. Stewart, p. 423).
- Waghmare, S., Vishwas, D., & Singh, M. (2018). Effect of Weather Parameters on Growth and Yield of Bt Cotton Hybrids at Different Sowing Dates. *Advances in Life Sciences*, *5*.
- Wairegi, L. W. I., & van Asten, P. J. A. (2013). Exploring the scope of fertilizer use in the East African region. In *Agro-Ecological Intensification of Agricultural Systems in the African Highlands*. Routledge.
- Wang, F., Huang, J., Tang, Y., & Wang, X. (2007). New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area Index of Rice. *Rice Science*, *14*(3), 195-203. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(07\)60027-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(07)60027-4)
- 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.

- Wezel, A., & Soldat, V. (2009). A quantitative and qualitative historical analysis of the scientific discipline of agroecology. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 7(1), 3-18. <https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0400>
- WFP. (2021a). *Seasonal : Rainfall and Vegetation : Visualizations—Dataviz | WFP - VAM*. https://dataviz.vam.wfp.org/seasonal_explorer/rainfall_vegetation/visualizations#
- WFP, (World Food Program, Regional Bureau Dakar). (2021b). *West Africa : The 2021 Rainy Season in Review* (Rainy Season in Review, p. 26) [Seasonal report, food security analysis]. <https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000133543/download/>
- Wineman, A., Anderson, C. L., Reynolds, T. W., & Biscaye, P. (2019). Methods of crop yield measurement on multi-cropped plots : Examples from Tanzania. *Food Security*, 11(6), 1257-1273. <https://doi.org/10.1007/s12571-019-00980-5>
- Yaméogo, G., SAWADOGO, K. S., BASTIDE, B., BELEM, M., OUEDRAOGO, I., & G., Y. (2004). *Rapport final sur la Méthodologie de collecte des données de la biomasse herbacée et ligneuse*. INERA.
- Yousfi, S., Peira, J. F. M., Horra, G. R. D. L., & Ablanque, P. V. M. (2019). Remote Sensing : Useful Approach for Crop Nitrogen Management and Sustainable Agriculture. In *Sustainable Crop Production*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89422>
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528(7580), 51-59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
- Zhang, X., Davidson, E. A., Zou, T., Lassaletta, L., Quan, Z., Li, T., & Zhang, W. (2020). Quantifying Nutrient Budgets for Sustainable Nutrient Management. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(3), e2018GB006060. <https://doi.org/10.1029/2018GB006060>

VII Annexes

1 Revue de littérature sur la quantification des ressources organiques

Cette section présente les différentes méthodes existantes pour quantifier les ressources organiques d'une zone donnée. Parmi les ressources organiques, l'attention est portée sur les produits de récolte et les ressources pouvant servir à l'alimentation du bétail.

1.1 Produits de récolte

Dans sa revue de littérature intitulée « *Yield Estimation of Food and Non-food Crops in Smallholder Production Systems* », Sapkota et al. (2016) décrit dix méthodes couramment utilisées dans la littérature pour la quantification des produits de récolte. Les caractéristiques de chaque méthode sont reprises dans le Tableau 40.

Tableau 40 – Comparaison de diverses méthodes d'estimation de la production végétale en fonction de leur rentabilité, de leur échelle et de leur précision (adapté de Sapkota et al., 2016).

Méthode	Description	Coût-efficacité	Echelle	Précision de l'estimation, erreurs et biais
Coupe de culture (angl. <i>crop cut</i>)	Échantillonnage de petites sous-parcelles (1-5 de 1-50 m ²) dans un champ cultivé, méthode standard	Exige beaucoup de temps et de travail	Champ, ferme et parfois paysage	Tendance à la surestimation
Estimation de l'agriculteur / Enquêtes	Demander aux agriculteurs d'estimer (avant la récolte) ou de se rappeler (après) le rendement d'une parcelle, d'un champ ou d'une exploitation individuelle	Bon marché et rapide, permet de gagner du temps et de l'argent	De la ferme au paysage	Estimation assez précise mais nécessite une supervision adéquate. Subjectif. Parfois, les agriculteurs surestiment ou sous-estiment délibérément. Erreur supplémentaire possible lors de l'estimation de la taille de la parcelle
Estimation par nombre et poids de grain	Calculer le nombre moyen d'épis/de gousses sur 1m ² puis le nombre de grains par épis/de gousses et convertir en poids via la littérature	Facile et rapide	Champ, ferme et parfois paysage	Les carrés doivent être choisis aléatoirement pour éviter tout biais
Récolte complète	Récolte de l'entièreté de la parcelle, standard pour comparer les méthodes	Coûteuse, exigeante en main d'œuvre	Champ, ferme et étude de cas (standard)	Presque sans biais ou erreur
Echantillonnage d'unité de récolte	Quelques unités de récolte sont pesées (bassine, brouette, etc.) et le nombre total d'unités de récolte est compté	Rentable	De l'exploitation agricole au paysage	Risque d'erreur lorsque les agriculteurs récoltent dans plusieurs zones à la fois, ce qui n'est pas possible avec la récolte échelonnée.
Évaluation par des experts	Résumé des opinions des agronomes de terrain, des agents de vulgarisation et des chercheurs ; évaluation	Modérément rentable	De l'exploitation au paysage	Les risques d'erreur augmentent si on fait appel à différentes équipes d'experts ou des vulgarisateurs pour

	visuelle combinable avec des mesures sur le terrain et formules empiriques			estimer le rendement dans leur propre zone. Subjectif
Carte de culture	Estimation par l'agriculteur avec support cartographique	Coûteuses et laborieuses	Du champ à l'exploitation	Biais dû à l'analphabétisme, à l'utilisation d'unités locales, etc.
Modélisation des cultures	Les modèles de culture statistiques ou mécanistiques établissent une relation entre le rendement et différents facteurs	Rentable	Paysage	Erreur moindre si paramétré et calibré de manière adéquate. Ne prend pas compte des améliorations induites par la technologie agricole
Modèles allométriques	Utilise les relations mathématiques entre les caractéristiques morphologiques des plantes et le rendement des cultures	Rentable	Champ	Convient à quelques cultures seulement
Télé-détection ²⁸	Données spectrales utilisées pour construire des indices de végétation corrélés à la biomasse verte, qui peut être utilisée comme indicateur indirect du rendement	Rentable	Paysage	Risque d'erreur dans les cas où différentes cultures ont la même signature spectrale

Il convient de choisir la ou les bonnes méthodes en fonction du contexte de l'étude et de la précision désirée. Sapkota et al. (2016) insistent sur le fait que « des approches multiples sont nécessaires pour optimiser les ressources et également pour obtenir des estimations précises à différentes échelles ». Malgré ce large choix de méthodes, la quantification des récoltes dans un contexte d'agriculture de petite taille reste un défi à cause de la haute hétérogénéité des performances végétales au sein d'un même champ, la plantation continue, les associations de cultures, et les récoltes échelonnées dans le temps.

1.1.1 Le cas des cultures associées

La revue de Sapkota et al. (2016) ne dit rien de la méthode à adopter pour calculer le rendement des cultures associées, or celles-ci peuvent représenter une part importante des surfaces agricoles dans un contexte d'agriculture de petite taille en ASS. Selon un rapport de la FAO, 60 à 80 % des parcelles contiendraient des cultures associées en Afrique de l'Ouest et au Sahel (Sud et al., 2017). Ce même rapport souligne qu'il est important de prendre cela en compte afin de ne pas sous-estimer les rendements, mais il n'existe pas de consensus sur la méthodologie à appliquer. Cependant, de nombreuses publications n'expriment pas clairement la méthode utilisée, ce qui peut porter à confusion (Sud et al., 2017; Wineman et al., 2019).

²⁸ Cf. la section I3.3 (Les estimations de biomasse) pour plus de détails sur cette méthode.

Le choix du dénominateur (la superficie) pour l'estimation du rendement d'une spéculatation en culture associée n'est pas anodin. Fermont & Benson (2011) proposent quatre méthodes pour le cas de plusieurs cultures annuelles sur une même parcelle (Figure 41). La méthode 1 ignore les parcelles associées pour les calculs de rendement et ne conserve que les parcelles en monoculture. La méthode 2 considère les parcelles associées mais uniquement la culture principale de chaque parcelle. Les spéculatations qui représentent le plus faible pourcentage de la parcelle sont ignorées. La surface utilisée pour les calculs est la surface totale de la parcelle. La méthode 3 tient compte de toutes les spéculatations de toutes les parcelles et utilise l'aire de la parcelle totale pour chaque spéculatation. Enfin, la méthode 4 alloue une part de la surface de la parcelle à chaque spéculatation. L'estimation de la part de chaque spéculatation peut se faire par estimation visuelle de la parcelle, sur base d'une mesure directe (densité de plantes, largeur des bandes, etc.) ou en utilisant un ratio fixe pour chaque combinaison de spéculatation. Les méthodes 3 et 4 sont les plus couramment utilisées. La méthode 4 (avec estimation visuelle des proportions) est la méthode utilisée par Eurostat (Mortensson, Landell, and Wahlstedt 2004 cités dans Fermont & Benson, 2011).

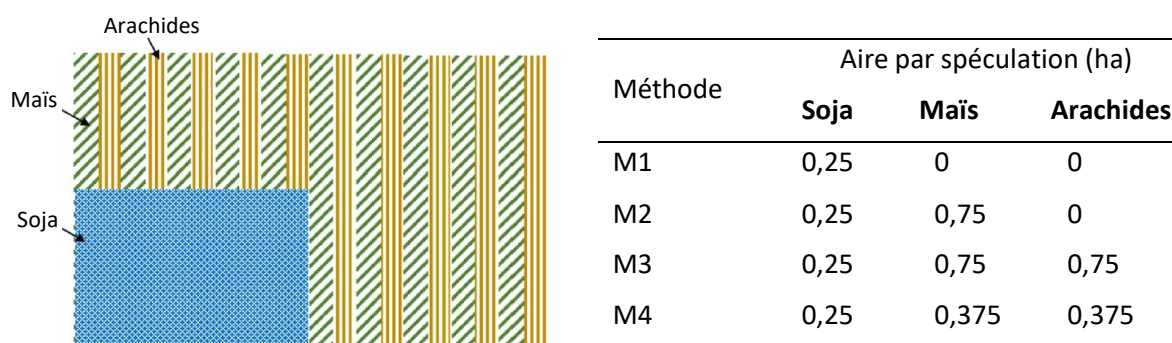


Figure 41 – Illustration des quatre méthodes de calcul des aires de chaque spéculatation pour une parcelle de soja et une parcelle de maïs contenant de l'arachide entre ses lignes.

1.2 Résidus de culture

Les méthodes présentées pour la quantification des produits de récolte peuvent être adaptées aux résidus de culture (RC). La différence majeure est qu'on ne peut tirer profit des connaissances des agriculteurs car ils ne quantifient pas les RC. Les méthodes peuvent être classées en deux catégories : les mesures directes et indirectes.

Les mesures directes consistent à récolter une partie (entre une plante et plusieurs mètres carrés) ou l'entièreté d'une parcelle pour peser la masse fraîche de résidus. Tous les types de résidus (feuilles, tiges, etc.) peuvent être pesés séparément. La partie récoltée (p.ex., grains) est aussi pesée afin de pouvoir établir une relation entre la masse de résidus et le produit de récolte. La biomasse totale (résidus et récolte) est ensuite séchée au four à 65°C et pesée à nouveau. Ces deux masses permettent de définir l'indice de récolte (IR) comme la masse de produits de récolte divisée par la biomasse totale (Tittonell et al., 2005).

L'estimation indirecte des rendements en RC se fait via l'IR. La masse de produits de récolte est alors multipliée par $(1 - IR)/IR$. L'indice peut être obtenu à partir d'un sous-échantillon pesé ou via des données de la littérature (Liu et al., 2008; Tittonell et al., 2005; Valbuena et al., 2015). Cependant, l'IR est influencé par différents facteurs. En combinant les résultats de plusieurs études sur les RC, Leeuw (1997) montre que l'IR augmente quand le rendement en grains augmente (et donc le rendement en RC diminue).

Une méthode intermédiaire consiste à mesurer des caractéristiques morphologiques des plantes afin d'estimer la biomasse totale et la biomasse récoltée à l'aide de relations allométriques (Tittonell et al., 2005). A partir de là, on peut déduire l'IR et donc la masse de RC.

1.3 Biomasse herbacée

La mesure de la biomasse herbacée peut se faire par méthode destructive (coupe et échantillonnage), par mesure indirecte au sol, ou par estimation via des images satellites (Hiernaux et Justice, 1986; Justice et Hiernaux, 1986; Hanan, Prince et al., 1991; Djaby, 2000; Crépeau, Bennouna et al., 2003 cités dans Djaby, 2010). Aussi, des modèles existent pour simuler la production herbacée. Par exemple, le modèle STEP (*Sahelian Transpiration Evaporation and Production*), utilise une série de données sur le climat et les propriétés du sol d'une région pour prédire la biomasse herbacée produite sur une saison (Mougin et al., 1995, cité dans Hiernaux et al., 2009).

La plupart des estimations avec des mesures au sol se font en trois étapes : (1) la sélection d'une zone donnée. (2) La stratification d'un certain nombre de petites surfaces (souvent appelées « quadrats », de l'ordre de 1 m²). On estime à quelle strate appartient chaque quadrat et on calcule la fréquence de chaque strate pour la zone donnée. (3) La mesure de la masse végétale d'un certain nombre de quadrats de chaque strate en procédant à une récolte intégrale, suivie d'un séchage de l'échantillon. La biomasse herbacée de la zone est ensuite calculée en pondérant la masse moyenne de chaque strate par sa fréquence (Bogo et al., 2017; Daget & Poissonet, 2010; Djaby, 2010; Yaméogo et al., 2004)

1.4 Biomasse foliaire ligneuse

Comme le souligne Djaby (2010), « la mesure des ligneux quant à elle, reste complexe et en raison du caractère destructeur des mesures directes, les mesures sont effectuées à partir de relations d'allométrie (Cissé, 1980; Hiernaux, 1980; Le Houerou, 1980; Breman, Kessler et al., 1991a) ». Ces relations sont (le plus souvent) spécifiques à chaque espèce ligneuse et elles utilisent le diamètre de tronc à hauteur d'homme comme facteur explicatif, dans la majorité des cas (Henry et al., 2011).

L'estimation de la biomasse foliaire peut aussi se faire de manière indirecte à l'aide d'images satellites. Soit en établissant une relation entre des mesures de terrain et des informations fournies par ces images (Bogo et al., 2017; Karlson et al., 2015; Rahimi et al.,

2021). Soit en identifiant les arbres sur les images pour estimer leur diamètre de couronne et ainsi déduire leur biomasse foliaire par relation allométrique (Franklin & Hiernaux, 1991).

1.5 Tableaux des valeurs d'autres études

Tableau 41 – Revue de littérature sur les valeurs de biomasse herbacée des savanes en Afrique de l'Ouest.T

Auteur	Pays - Région	Lat. °Nord	PPT° mm/an	Type végétation	Phyt. au pic Mg/ha	Tot. An. Mg/ha/an
(Hiernaux et al., 2009)	Niger (sahel) - 1994	13	600	Savane et jachère	1.6	
	Niger (sahel) - 2006	13	575	Savane et jachère	0.6	
(Agonyissa & Sinsin, 1998)	Bénin	9	1200	Savane herbeuse	5.2	
				Savane arborée	5.1	
				Forêt claire	4.1	
				jachère	3.5	
(Scurlock, 2002)	Côte d'ivoir	6	1300	Herbeuse -Londetia	5.7	8.3
				Intermédiaire - L		9.2
				Herbeuse	8.0	15.5
				Intermédiaire		14.9
				Arbustive	5.6	12.8
				Dense		16.1
				Forestière	5.3	14.5
(Jarlan et al., 2008)	Sahel -2003	15	n.r.	n.r.	2.4	
	Sahel - 2004	15	n.r.	n.r.	1.2	
(Diouf, 2016)	Sénégal (Sahel)	13	700	Ensemble du terroir	2	
		15	500	Ensemble du terroir	1.6	
(Djaby, 2010)	Sahel Niger	13	560	Jachère	1.0	
		13	560	Friches	0.8	
(Bogo et al., 2017)	Bénin (Nord-est)	11	914	Ensemble du terroir	1 à 5	
(Jacques et al., 2014)	Sahel	15	450	Ensemble du terroir	2	
(Sinsin, 1993)	Bénin (centre-Est)	10	1090	Jachère de plateau	7.3	
				Jachère de bas-fonds	10.1	
				Savane de plateau	4.5 à 6.6	
				Savane de bas-fond	9.8	
				Formation ripicole	15.8	
(Sanon et al., 2014)	Burkina-Faso	10	1200	Savane arbustive	3.6	
				Savane arborée claire	3.3	
				Savane arborée dense	2.9	
				Formation ripicole	10.6	
(Samandougou et al., 2019)	Burkina-Faso	11	900	Dépression	4.7	
				Jachère	2.2	
(Yaméogo et al., 2004)	Burkina-Faso	12	760	Buttes cuirassées	2.2	
				Bas glacis	3.3	

Lat. = latitude, PPT° = précipitation annuelle, Phyt. = phytomasse, Tot. An. = estimation de la phytomasse totale annuelle ; n.r. = non-renseigné.

Tableau 42 – Revue de littérature sur les valeurs de biomasse foliaire ligneuse des savanes en Afrique de l’Ouest.

Auteur	Pays - Région	Lat. °Nord	PPT° mm/an	Type végétation	Phyt. au pic kg/ha	Tot. An. kg/ha/an
(Scurlock, 2002)	Côte d’ivoir	6	1300	Herbeuse/harbustive		430
				Arbustive		1000
				Dense		2380
				Forestière		5530
(Le Houérou, 1980)	Afrique	-	1100	Forêt	1400	
(Diouf, 2016)	Sénégal - Sahel	13	700	Ensemble du terroir	3400	
		15	500	Ensemble du terroir	1500	
(Djaby, 2010)	Niger - Sahel	13	560	En champ	49	
				Jachère	655	
				Sols incultivable	974	

Lat. = latitude, PPT° = précipitation annuelle, Phyt. = phytomasse, Tot. An. = estimation de la phytomasse totale annuelle.

2 Les nutriments

2.1 Définition et importance des nutriments en agronomie

De manière générale, un nutriment est défini comme une « *substance organique ou minérale, directement assimilable sans avoir à subir les processus de dégradation de la digestion* » (Larousse, s. d.). En nutrition végétale, il est important de faire la distinction entre les nutriments sous formes organiques et minérales, car seuls ces derniers sont assimilables directement par les plantes. La matière organique doit d’abord subir le processus de décomposition (principalement effectué par les micro-organismes) afin de libérer des nutriments assimilables par les plantes (Russell & Gilmore, 2018). Une définition plus précise d’un nutriment minéral a été donné par Brown et al. (2021, p. 9 traduit de l’anglais) :

« *Un élément minéral nutritif pour les plantes est un élément qui est essentiel ou bénéfique pour la croissance et le développement de la plante [...] ou du produit récolté [...]. Un nutriment végétal peut être considéré comme essentiel si le cycle de vie d’une diversité d’espèces végétales ne peut être achevé en l’absence de cet élément [...].* »

La plupart des scientifiques s’accordent pour dire qu’environ 18 éléments peuvent être classifiés comme « essentiels » pour la plante : carbone (C), hydrogène (H), oxygène (O), azote (N), phosphore (P), potassium (K), soufre (S), calcium (Ca), magnésium (Mg), chlore (Cl), bore (B), zinc (Zn), manganèse (Mn), fer (Fe), cuivre (Cu), molybdène (Mo), nickel (Ni) et cobalt (Co) (Alley & Vanlauwe, 2009; Brown et al., 2021). Tous ne sont pas essentiels pour toutes les plantes. Le C, H et O sont assimilés via l’air et l’eau et ne sont pas considérés comme des éléments minéraux. Les autres sont classifiés en macronutriments primaires (N, P, K), secondaires (S, Mg, Ca) et en micronutriments (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl, Ni, Co) sur base de leur concentration moyenne dans la plante : de 0,2 à 5,0 % (ou plus) pour les macronutriments primaires et secondaires et 0,1 à 100 µg/g pour les micronutriments. La fertilité d’un sol est en partie déterminée par sa capacité à stocker ces éléments et les fournir à la plante, mais de

nombreux autres facteurs entrent en jeu, comme des facteurs biotiques, physiques et climatiques (Alley & Vanlauwe, 2009).

La croissance de la plante est limitée par l'élément le moins disponible quand tous les autres sont présents en quantité adéquate (loi de Liebig sur le minimum, Figure 42). Comme le soulignent Alley & Vanlauwe (2009), beaucoup de sols contiennent des quantités suffisantes de la majorité des éléments et seuls quelques-uns nécessitent d'être apportés. L'azote, le phosphore et le potassium (NPK) sont généralement les plus limitants, c'est pourquoi de nombreux fertilisants synthétiques se disent « complets » alors qu'ils ne contiennent que ces trois éléments. Toutefois, il existe de nombreux systèmes qui nécessitent d'autres apports que du NPK (par exemple, le Ca pour la production des cacahuètes aux Etats-Unis, le S pour la production de fourrage en Australie, etc.)

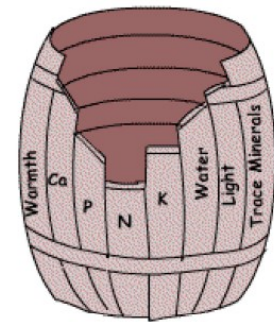


Figure 42 – Loi de Liebig sur le minimum : la croissance est limitée par l'élément le moins présent (Mack, 2019)

Toujours selon Alley & Vanlauwe (2009), la gestion intégrée des nutriments de la plante (angl. *Integrated Plant Nutrient Management*) consiste en l'application des doses adéquates de nutriments, au bon moment, pour répondre au besoin de la plante sans excès. Selon les auteurs, cette gestion doit commencer par l'évaluation du stock de nutriments de la parcelle. Cependant, dans les régions du Sud, comme l'ASS, les outils permettant cette évaluation sont rarement disponibles.

2.2 Cycle complet du phosphore et de l'azote

Dans ce travail, nous nous intéresseront à deux nutriments en particulier : le phosphore et l'azote (cf. justification dans la revue de littérature et la méthodologie). Leur cycle respectif est présenté ci-dessous (Figure 43).

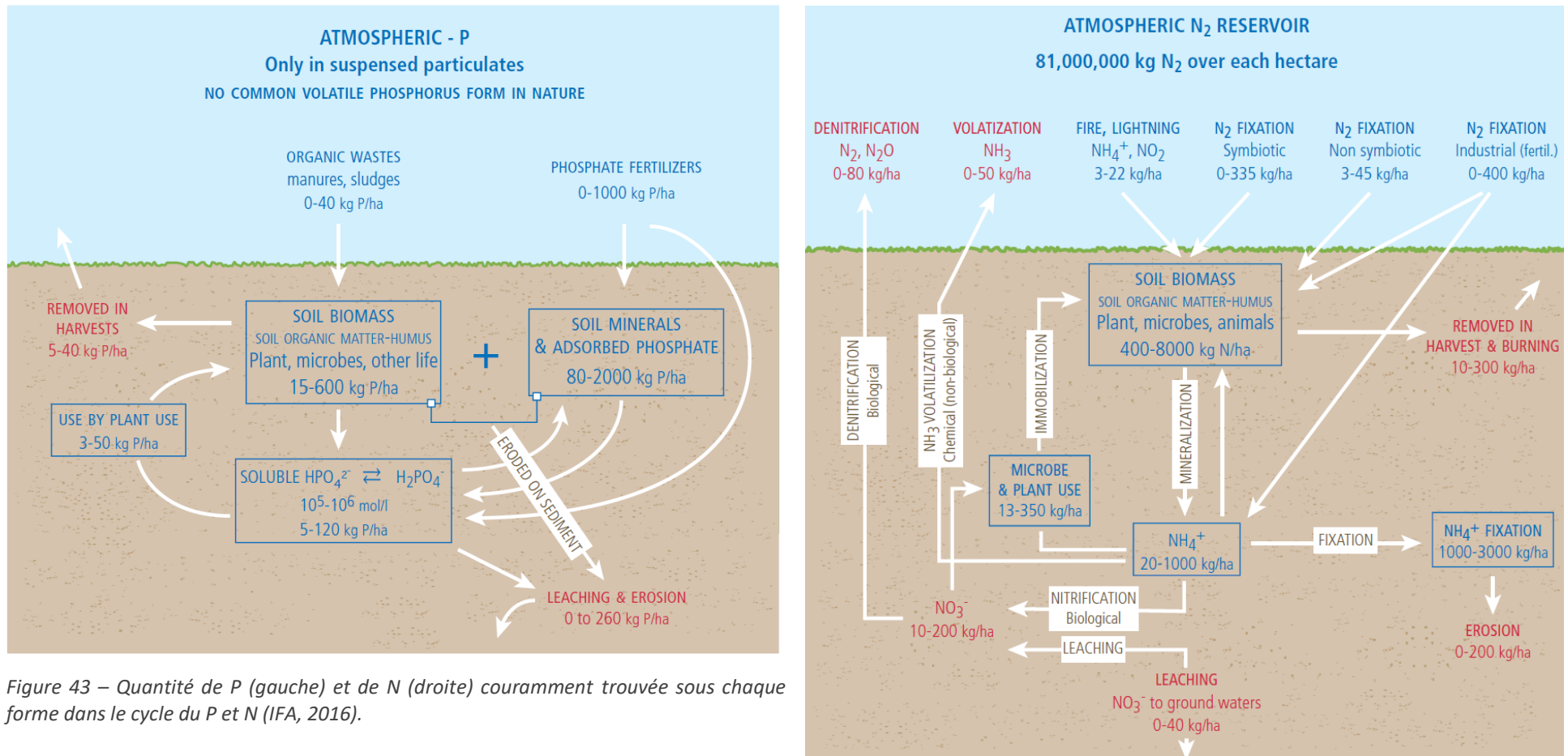


Figure 43 – Quantité de P (gauche) et de N (droite) couramment trouvée sous chaque forme dans le cycle du P et N (IFA, 2016).

3 Formulaire KoBoToolbox pour la collecte de données

3.1 Enquêtes pour la quantification des ressources et la caractérisation des exploitations

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir	09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir	09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir
<p>Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir</p> <p>Nom de l'enquêteur</p> <p><input checked="" type="radio"/> François Greiner</p> <p><input type="radio"/> Tom Kenda</p> <p><input type="radio"/> Victorine Djago</p> <p><input type="radio"/> Enquêteur 1</p> <p><input type="radio"/> Enquêteur 2</p> <hr/> <p>IDENTIFICATION DU PRODUCTEUR</p> <p>Village</p> <p><input type="radio"/> KOTOPOUNGA</p> <p><input type="radio"/> MOUSSASANMOU</p> <p><input checked="" type="radio"/> GONRI</p> <p><input type="radio"/> TONRI</p> <p><input type="radio"/> PESSAGOU</p> <p><input type="radio"/> SAMMONGOU</p> <hr/> <p>Interviewé - Prénom + Nom</p> <p>Amadou ayouba</p> <hr/> <p>Interviewé - contact</p> <p>94077584</p> <hr/> <p>Interviewé - age</p> <p>84</p> <hr/> <p>Interviewé - sexe</p> <p><input checked="" type="radio"/> M</p> <p><input type="radio"/> F</p> <p><small>https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCKumik?instance_id=e2232b02-ee4e-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false</small></p>	<p>Interviewé - Niveau d'instruction</p> <p><input checked="" type="radio"/> Aucun</p> <p><input type="radio"/> Alphabétisé</p> <p><input type="radio"/> Primaire</p> <p><input type="radio"/> Secondaire</p> <p><input type="radio"/> Supérieur</p> <hr/> <p>Nombre total de personnes par ménage</p> <p><i>utile pour la quantification des déchets ménagers</i></p> <p>13</p> <hr/> <p>Nombre de main d'œuvre par ménage - adulte</p> <p><i>>26 ans</i></p> <p>3</p> <hr/> <p>Nombre de main d'œuvre par ménage - jeune</p> <p><i>15-26 ans</i></p> <p>2</p> <hr/> <p>Nombre de main d'œuvre par ménage - enfant</p> <p><i><15 ans</i></p> <p>3</p> <hr/> <p>moyens de transport</p> <p><input type="checkbox"/> Aucun</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Vélo ou moto</p> <p><input type="checkbox"/> Tricycle</p> <p><input type="checkbox"/> Brouette</p> <p><input type="checkbox"/> Charette</p> <p><input type="checkbox"/> Voiture</p> <p><input type="checkbox"/> Autre</p> <hr/> <p>moyen de transport : Loué ou acheté ?</p> <p><input type="checkbox"/> Loué</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Acheté</p> <p><input type="checkbox"/> Loué et acheté (préciser)</p> <p><small>https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCKumik?instance_id=e2232b02-ee4e-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false</small></p>	<p>Types d'exploitations</p> <p><input type="checkbox"/> Site Maraîcher</p> <p><input type="checkbox"/> Exploitations maraîchères individuelles</p> <p><input type="checkbox"/> Exploitations appartenant aux peulhs</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exploitations appartenant aux agro-éleveurs et axée sur Cultures pluviales</p> <p><input type="checkbox"/> Exploitations appartenant aux agriculteurs axées sur les cultures pluviales</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Exploitations axées sur cultures pluviales et cultures maraîchères</p> <p><input type="checkbox"/> Exploitations pratiquant l'association vergers-cultures</p> <p><input type="checkbox"/> Autre</p> <hr/> <p>Autre, précisez (éventuellement préciser nombre d'animaux OU taille, type, quantité récoltée dans verger)</p> <p><i>Animaux 1 (nombre), Animaux 2 - Verger, taille - Autre</i></p> <hr/> <p>CULTURES PLUVIALES</p> <hr/> <p>» Nombre et taille de parcelles</p> <p>Combien de parcelles avez-vous ?</p> <p><i>Préciser que c'est pour 2020 !!!</i></p> <p>6</p> <hr/> <p>Taille parcelle N°1 (en ha)</p> <p><i>La plus grande (faire dans l'ordre)</i></p> <p>4,0</p> <hr/> <p>Taille parcelle N°2 (en ha)</p> <p>3,0</p> <hr/> <p>Taille parcelle N°3 (en ha)</p> <p>2,0</p> <hr/> <p>Taille parcelle N°4 (en ha)</p> <p>1,0</p> <p><small>https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCKumik?instance_id=e2232b02-ee4e-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false</small></p>

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Taille parcelle N°5 (en ha)
1,0

Taille parcelle N°6 (en ha)
La plus petite
0,5

» Types de sols

Types de sols des parcelles - Gonri <i>Pour Gonri</i>	TémSÓWA	TémGBANNAN ROU	TémDANGOU	TémYANNON	Autre
Parcelle 1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Parcelle 2	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Parcelle 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Parcelle 4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Parcelle 5	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Parcelle 6	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

Autre type de sol
Indiquer N° parcelle + nom/caractéristiques du sol

» Parcelles 1, 2 et 3

» » Infos parcelle

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-ee4e-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 4/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Numéro de la parcelle (que 3 plus grandes !!!)
Juste pour le bon encodage dans excel.

1
 2
 3

Comment elle a été acquise ?

Achat
 Héritage
 Location
 Propriété communautaire
 Prêt/Cession temporaire
 Don
 Autre

Son niveau de fertilité ?

Faible Moyen Elevé

Niveau de fertilité

» » Culture associée 1, 2 et 3 (2020) sur parcelle x

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-ee4e-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 5/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Pour rappel, nous sommes sur la parcelle...
Juste pour le bon encodage dans excel.

1
 2
 3

La spéculation
POUR 2020 !

Mais
 Fonio
 Sorgho rouge
 Sorgho Blanc
 Petit mil
 riz
 Igname
 manioc
 taro
 coton
 sésame
 arachide
 anacarde
 niébé
 soja
 lentille
 voandzou
 pois d'angole
 jachère
 autres

Le % de cette spéculation dans le champ

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Pourcentage

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-ee4e-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 6/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

La quantité récoltée

36,0

Quelle est l'unité de cette quantité ?

Sacs de 100kg

Sacs de 50kg

Kg

Une bassine (25kg)

Un tricycle (300kg)

Un tricycle (500kg)

Brouette de MO (20kg)

Charette (250kg)

Autre

Unité (Autre ou précision)

» » **Quels amendements organiques sur parcelles 1,2,3**

Quels amendements organiques ont été utilisés ?

Compost

Cendres

Fumier porcin

Fumier bovin

Fumier ovins/caprins

Fientes de volailles

Parcage

Déchets ménagers

Autre

» » **Engrais minéraux**

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCKumliq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 7/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Pour rappel, nous sommes sur la parcelle....

Juste pour le bon encodage dans excel.

1

2

3

Quel engrais minéral utilisez-vous ?

Si plusieurs, le questionnaire proposera après d'en ajouter d'autres

NPK 14-23-14

NPK 15-15-15

NPK, non défini

Urée

Autre

Sur quelles spéculations ?

Mais

Fonio

Sorgho rouge

Sorgho Blanc

Petit mil

riz

Igname

manioc

taro

coton

sésame

arachide

anacarde

niébé

soja

lentille

voandzou

pois d'angole

jachère

autres

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCKumliq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 11/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Quantité appliquée

8,0

L'unité

Sacs de 100kg

Sacs de 50kg

Kg

Une bassine (25kg)

Un tricycle (300kg)

Un tricycle (500kg)

Brouette de MO (20kg)

Charette (250kg)

Autre

L'unité (précision ou autre)

Sur quelle superficie ?

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

%

10

20

30

40

50

60

70

80

90

100

Pour rappel, nous sommes sur la parcelle....

Juste pour le bon encodage dans excel.

1

2

3

Quel engrais minéral utilisez-vous ?

Si plusieurs, le questionnaire proposera après d'en ajouter d'autres

NPK 14-23-14

NPK 15-15-15

NPK, non défini

Urée

Autre

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCKumliq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 12/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

L'unité
 Sacs de 100kg
 Sacs de 50kg
 Kg
 Une bassine (25kg)
 Un tricycle (300kg)
 Un tricycle (500kg)
 Brouette de MO (20kg)
 Charette (250kg)
 Autre

L'unité (précision ou autre)

Sur quelle superficie ? 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

%

» Residus cereales

Que faites-vous des résidus de tiges de céréales ? 0 P 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Surtout besoin de % pour utilisation principale ; P pour pourcentage inconnu

Alimentation humaine

Alimentation bétail

Laissé sur pieds ou déversé dans le champ

Laissé sur pieds puis brûlé

Brûlé

Litière pour bétail

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCKumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 20/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Don aux éleveurs pour alimentation de leurs bétails

Déversé en dehors du champs

Composté

Autre

Autre, préciser

Que faites-vous des résidus de spathes et rafles de céréales ? 0 P 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Surtout besoin de % pour utilisation principale ; P pour pourcentage inconnu

Alimentation humaine

Alimentation bétail

Laissé sur pieds ou déversé dans le champ

Laissé sur pieds puis brûlé

Brûlé

Litière pour bétail

Don aux éleveurs pour alimentation de leurs bétails

Déversé en dehors du champs

Composté

Autre

Autre, préciser

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCKumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 21/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Autre, préciser

Que faites-vous des résidus de feuilles de céréales ? 0 P 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Surtout besoin de % pour utilisation principale ; P pour pourcentage inconnu

Alimentation humaine

Alimentation bétail

Laissé sur pieds ou déversé dans le champ

Laissé sur pieds puis brûlé

Brûlé

Litière pour bétail

Don aux éleveurs pour alimentation de leurs bétails

Déversé en dehors du champs

Composté

Autre

Autre, préciser

» Residus cultures de rente

Que faites-vous des résidus de tiges de cultures de rente (coton,...) ? 0 P 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Surtout besoin de % pour utilisation principale ; P pour pourcentage inconnu

Alimentation humaine

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCKumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 22/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

» Infos maraichage

Combien de parcelles possède l'exploitant ?
5

Quelle est la taille moyenne d'une planche [m²]
D'abord demander s'il fait des planches, parfois c'est juste dans le champ

Si plusieurs taille moyennes, indiquer ici et préciser quand
3m de large et ligne oignon et tomate, 2x3m oignon + juste en saison sèche

Types de sols des parcelles - Gonri <i>Pour Gonri</i>	TémSÓWA	TémGBANNAN ROU	TémDANGOU	TémYANNON	Autre
Parcelle 1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Parcelle 2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Parcelle 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Parcelle 4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Parcelle 5	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Parcelle 6	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Autre type de sol
Indiquer N° parcelle + nom/caractéristiques du sol
Bas fond

» Parcelle 1,2,3 - Maraichage

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 29/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Numéro de la parcelle
Seulement parcelles 1,2,3

1
 2
 3

Taille parcelle [ha]
0,25

Nombre de planches sur cette parcelle

Comment elle a été acquise ?

Achat
 Héritage
 Location
 Propriété communautaire
 Prêt/Cession temporaire
 Don
 Autre

Son niveau de fertilité ?

Faible Moyen Elevé

Niveau de fertilité

Numéro de la parcelle
Seulement parcelles 1,2,3

1
 2
 3

Taille parcelle [ha]
0,25

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 30/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Son niveau de fertilité ?

Faible Moyen Elevé

Niveau de fertilité

» Cultures maraichères sur parcelle 1,2,3

On est sur parcelle...

1
 2
 3

Culture maraichère

Oignon
 Tomate
 Choux
 Laitue
 Haricot vert
 Aubergine
 Piment
 Laitue
 Pastèque
 Poivron
 Concombre
 Gombo
 Courgettes
 Carotte
 Vernonia
 Amarante
 Autre

Nombre de planches (sur tous les cycles)

% de cette culture par planche (si associée)

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 32/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Quantité récoltée
4000,0

Donné au total sur tout le champs ou par planche ?
 Total
 Par planche

L'unité
 Sacs de 100kg
 Sacs de 50kg
 Kg
 Une bassine (25kg)
 Un tricycle (300kg)
 Un tricycle (500kg)
 Brouette de MO (20kg)
 Charette (250kg)
 Autre

Unité (autre ou précision)
Pesé avant de mettre dans bacs de 30kg

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 33/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

L'unité
 Sacs de 100kg
 Sacs de 50kg
 Kg
 Une bassine (25kg)
 Un tricycle (300kg)
 Un tricycle (500kg)
 Brouette de MO (20kg)
 Charette (250kg)
 Autre

Unité (autre ou précision)

» Amendements sur parcelle 1,2,3

» » Quels amendements parcelle 1,2,3

On est sur parcelle...
 1
 2
 3

Quels amendements organiques ont été utilisés ?
 Compost
 Cendres
 Fumier porcin
 Fumier bovin
 Fumier ovins/caprins
 Fientes de volailles
 Parage
 Déchets ménagers
 Autre

» » Fumier bovin

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 37/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Quantité de fumier bovin

L'unité
 Sacs de 100kg
 Sacs de 50kg
 Kg
 Une bassine (25kg)
 Un tricycle (300kg)
 Un tricycle (500kg)
 Brouette de MO (20kg)
 Charette (250kg)
 Autre

Unité (autre ou précision)
Plus de 50 brouettes sur tout le jardin.

Sur quel % de la superficie ça a été appliqué ?
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Superficie (%)

» » Engrais minéral

On est sur parcelle...
 1
 2
 3

Quel engrais minéral utilisez-vous ?
Si plusieurs, le questionnaire proposera après d'en ajouter d'autres
 NPK 14-23-14
 NPK 15-15-15
 NPK, non défini
 Urée
 Autre

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 38/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

L'unité

Sacs de 100kg

Sacs de 50kg

Kg

Une bassine (25kg)

Un tricycle (300kg)

Un tricycle (500kg)

Brouette de MO (20kg)

Charette (250kg)

Autre

L'unité (autre ou précision)

Sur quelle superficie ?

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

%

» Utilisation globale des déchets/residus de maraîchage

Alimentation humaine (%)

Alimentation bétail (%)

Laissé sur pieds ou déversé dans le champ (%)

100

Laissé sur pieds puis brûlé (%)

Déversé en dehors du champ (%)

brûlé (%)

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 45/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Sur quel type de culture vous appliquez en priorité la MO ?

Cultures pluviales

Maraîchage

Autre

Sur quelles cultures vous appliquez en priorité la MO ?

Maraîchage

Oignon

Tomate

Choux

Laitue

Haricot vert

Aubergine

Piment

Laitue

Pastèque

Poivron

Concombre

Gombo

Courgettes

Carotte

Vernonia

Amarante

Autre

Sur quelles parcelles appliquez-vous en priorité la MO ?

En d'autres mots, est-ce que vous tenez plus compte de la culture ou du sol pour appliquer MO

la plus fertile

la moins fertile

je n'en tiens pas compte

Est-ce que vous trouvez que vous appliquez assez de MO sur vos champs ? Estimez votre échelle de suffisance

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Plus facile échelle de 1 à 10. 0 s'il n'a aucune MO dispo. 10 s'il couvre tous ses besoins en MO.

%

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 47/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Comment estimez-vous la quantité à appliquer ?

sur recommandation des conseillers agricoles ou animateurs

sur base de leurs propres connaissances ou expérience

par l'expérience des autres producteurs du village

autre

pas de connaissance de la bonne dose à appliquer

» Compost assez appliqué ?

Vous estimez que vous appliquez assez de compost ?

Oui

Non

Je ne sais pas

Origine

Auto-production

Achat

Don

Contrat d'échange

Partage avec ses propres animaux

Partage avec animaux ne lui appartenant pas

Causes de trop faible application

Disponibilité

Transport

Coût

Main d'oeuvre

Maladie (ex. Peste) / Trop peu d'entretien (pas de vétérinaire) / Meurent

Vol (pas d'enclos...)

Autre

Autre, préciser

» Fumier porcin assez appliqué ?

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 48/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Vous estimez que vous appliquez assez de fumier porcin

Oui
 Non
 Je ne sais pas

Origine

Autoproduction
 Achat
 Don
 Contrat d'échange
 Parcage avec ses propres animaux
 Parcage avec animaux ne lui appartenant pas

Causes de trop faible application

Disponibilité
 Transport
 Coût
 Main d'oeuvre
 Maladie (ex. Peste) / Trop peu d'entretien (pas de vétérinaire) / Meurent
 Vol (pas d'enclos,...)
 Autre

Autre, préciser

» Fumier bovin assez applique ?

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-ee4e-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 49/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Vous estimez que vous appliquez assez de fientes de volaille

Oui
 Non
 Je ne sais pas

Origine

Autoproduction
 Achat
 Don
 Contrat d'échange
 Parcage avec ses propres animaux
 Parcage avec animaux ne lui appartenant pas

Causes de trop faible application

Disponibilité
 Transport
 Coût
 Main d'oeuvre
 Maladie (ex. Peste) / Trop peu d'entretien (pas de vétérinaire) / Meurent
 Vol (pas d'enclos,...)
 Autre

Autre, préciser
Il ne s'était pas encore intéressé à ça, mais maintenant il commence

» Parcage assez applique ?

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-ee4e-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 52/58

09/08/2022 18:43 Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir

Vous estimez que vous appliquez assez de parcage

Oui
 Non
 Je ne sais pas

Origine

Autoproduction
 Achat
 Don
 Contrat d'échange
 Parcage avec ses propres animaux
 Parcage avec animaux ne lui appartenant pas

Causes de trop faible application

Disponibilité
 Transport
 Coût
 Main d'oeuvre
 Maladie (ex. Peste) / Trop peu d'entretien (pas de vétérinaire) / Meurent
 Vol (pas d'enclos,...)
 Autre
 Animaux détruisent le sol

Autre, préciser

Utilisation du bétail

Avez-vous du bétail à vous ou qui vient chez vous ?

Bovins
 Ovins/Caprins
 Porcs
 Volaille
 Du bétail étranger vient sur mes parcelles récoltées
 Du bétail étranger vient sur mes jachères
 Rien

https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-ee4e-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false 53/58

09/08/2022 18:43	09/08/2022 18:43	09/08/2022 18:43																																																																																				
Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir	Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir	Quantification des ressources (biomasse et matière organique) disponibles pour soutenir l'agroécologie à l'échelle de terroir																																																																																				
<p>» Bovins</p> <p>Où vont-ils se nourrir en saison sèche ?</p> <p><input type="checkbox"/> Paturage rotatif dans les jachères du terroir</p> <p><input type="checkbox"/> Paturage rotatif dans sa propre jachère</p> <p><input type="checkbox"/> Parcage à proximité de sa case</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Parcage dans sa propre exploitation</p> <p><input type="checkbox"/> Parcage dans les exploitations du terroir</p> <p><input type="checkbox"/> Paturage dans ou près des forêts</p> <p><input type="checkbox"/> Divagation</p> <p><input type="checkbox"/> Pâturage dans les exploitations du terroir</p> <p><input type="checkbox"/> Pâturage dans sa propre exploitation</p> <p>Où vont-ils se nourrir en saison des pluies ?</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Paturage rotatif dans les jachères du terroir</p> <p><input type="checkbox"/> Paturage rotatif dans sa propre jachère</p> <p><input type="checkbox"/> Parcage à proximité de sa case</p> <p><input type="checkbox"/> Parcage dans sa propre exploitation</p> <p><input type="checkbox"/> Parcage dans les exploitations du terroir</p> <p><input type="checkbox"/> Paturage dans ou près des forêts</p> <p><input type="checkbox"/> Divagation</p> <p><input type="checkbox"/> Pâturage dans les exploitations du terroir</p> <p><input type="checkbox"/> Pâturage dans sa propre exploitation</p>	<p>Précisez la période (et durée) de parcage</p> <p><input type="checkbox"/> Janv</p> <p><input type="checkbox"/> Fev</p> <p><input type="checkbox"/> Mars</p> <p><input type="checkbox"/> Avril</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Mai</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Juin</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Juill</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Août</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Sept</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Oct</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Nov</p> <p><input type="checkbox"/> Dec</p> <p>Espèces fourragères (annuelles/pérennes) que vous utilisez pour nourrir les bovins ?</p> <p>En saison pluvieuse, surtout l'herbe mangée (peu ligneux)</p> <p>» Ovins/Caprins</p>	<p>Que faites-vous de vos déchets ménagers ? Quel pourcentage est ...</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>0</th> <th>10</th> <th>20</th> <th>30</th> <th>40</th> <th>50</th> <th>60</th> <th>70</th> <th>80</th> <th>90</th> <th>100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Jeté en dehors du champ</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input checked="" type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Alimentation animaux</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Composté</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Déversé sur le champ</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Jeté dans une fosse</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Autres</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </tbody> </table> <p>Autre, précisez</p> <p>Est-ce que vous accepteriez que nous laissons un seau chez vous dans lequel vous mettriez tout vos déchets ménager (reste de nourriture, partie nous utilisé pour l'alimentation, ...) et nous viendrions toutes les 24h pour peser la quantité totale de déchet ménager et puis nous vous laisserons l'utiliser comme vous avez l'habitude de le faire ?</p> <p>Oui</p>		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Jeté en dehors du champ	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	Alimentation animaux	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Composté	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Déversé sur le champ	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Jeté dans une fosse	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Autres	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																																																																											
Jeté en dehors du champ	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>																																																																											
Alimentation animaux	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																																																																											
Composté	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																																																																											
Déversé sur le champ	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																																																																											
Jeté dans une fosse	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																																																																											
Autres	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																																																																											
https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false	https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false	https://ee.kobotoolbox.org/edit/uRCkumiq?instance_id=e2232b02-eede-4d5e-a0b6-e887656d3b58&return_url=false																																																																																				

Figure 44 – 27 images montrant l'exemple d'un formulaire KoBoToolbox réalisé dans le village de Gonri. Les pages répétitives ont été retirées, l'enquête comporte au total 58 pages.

3.2 Points GPS pour la reconnaissance d'image satellite



<p>27/05/2022 12:29 Points GPS et échantillonnage</p> <h3>Points GPS et échantillonnage</h3> <p>Infos générales</p> <p>Présent pour cet échantillonnage</p> <p><input type="checkbox"/> François <input type="checkbox"/> Victorine <input type="checkbox"/> Tom <input type="checkbox"/> Autre(s)</p> <p>Type de point GPS ou d'échantillonnage</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Reconnaissance images satellite <input type="checkbox"/> Calibration images satellite <input type="checkbox"/> Echantillonnage cultures pluviales ou maraichère <input type="checkbox"/> Echantillonnage maraichage (pas coché) <input type="checkbox"/> Echantillonnage strate herbacée <input type="checkbox"/> Calcul déchets ménagers (seau) <input type="checkbox"/> Arbres dans savanne <input checked="" type="checkbox"/> Arbres dans et autour de champ <input type="checkbox"/> Type de sol / Ligne de séparation entre plusieurs types de sols <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/> Buisson dans savane</p> <p>Village</p> <p><input type="radio"/> KOTOPOUNGA <input type="radio"/> MOUSSASANMOU <input checked="" type="radio"/> GONRI <input type="radio"/> TONRI <input type="radio"/> PESSAGOU <input type="radio"/> SAMMONGOU</p> <p>Type de sol - Gonri</p> <p><input type="checkbox"/> TémSÔWA <input type="checkbox"/> TémGBANNANROU <input checked="" type="checkbox"/> TémDANGOU <input type="checkbox"/> TémYANNON <input type="checkbox"/> Autre</p> <p>Autre sol ou plusieurs sols, précisez</p> <hr/> <p>https://ee.kobotoolbox.org/edit/miw5ShJX?instance_id=c8efc530-52ea-48ee-a204-8975b4626fa6&return_uri=false 1/31</p>	<p>27/05/2022 12:29 Points GPS et échantillonnage</p> <h3>Si "Reconnaissance images satellite"</h3> <p>1</p> <p>Numéro du point GPS 001 pour point 1</p> <p>290</p> <p>Photo de l'endroit (eventuellement)</p> <p>1628496709959.jpg </p>  <p>Type de végétation</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Cult pluviale <input type="checkbox"/> Maraichage <input type="checkbox"/> Savanne <input type="checkbox"/> Forêt <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/> Jachère <input type="checkbox"/> Verger</p> <p>https://ee.kobotoolbox.org/edit/miw5ShJX?instance_id=c8efc530-52ea-48ee-a204-8975b4626fa6&return_uri=false 2/31</p>	<p>27/05/2022 12:29 Points GPS et échantillonnage</p> <p>Culture pluviale <i>Si associée, sélectionnez plusieurs</i></p> <p><input type="checkbox"/> Mais <input type="checkbox"/> Fonio <input type="checkbox"/> Sorgho Rouge <input type="checkbox"/> Sorgho Blanc <input type="checkbox"/> Petit mil <input type="checkbox"/> Riz <input type="checkbox"/> Igname <input type="checkbox"/> Manioc <input type="checkbox"/> Taro <input type="checkbox"/> Coton <input type="checkbox"/> Sesame <input type="checkbox"/> Arachide <input type="checkbox"/> Anacarde <input type="checkbox"/> Niébé <input checked="" type="checkbox"/> Soja <input type="checkbox"/> Lentille <input type="checkbox"/> Voandzou <input type="checkbox"/> Pois d'angle <input type="checkbox"/> Jachère <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/> Cannes à sucre</p> <p>Taille de la parcelle <i>approximatif !</i></p> <p><input type="radio"/> Très petite (point précis sur quelques m) <input type="radio"/> Petite (<1/4ha) <input type="radio"/> Moyen (1/4 à 3/4 ha) <input checked="" type="radio"/> Grand (3/4 à 2ha) <input type="radio"/> Très grand (>2ha)</p> <p>Type de sol - Gonri</p> <p><input type="checkbox"/> TémSÔWA <input type="checkbox"/> TémGBANNANROU <input checked="" type="checkbox"/> TémDANGOU <input type="checkbox"/> TémYANNON <input type="checkbox"/> Autre</p> <p>Autre sol ou plusieurs sols, précisez</p> <hr/> <p>https://ee.kobotoolbox.org/edit/miw5ShJX?instance_id=c8efc530-52ea-48ee-a204-8975b4626fa6&return_uri=false 3/31</p>
---	---	--

Figure 45 – 3 images montrant l'exemple d'un formulaire KoBoToolbox pour enregistrer des informations sur les points GPS. Ici, un seul point GPS est montré.

4 Nouvelle nomenclature des sols de la région

Tableau 43 – Détails sur la nouvelle nomenclature des sols de la région.

Nom commun	Points communs entre village	Topographie	Village d'occurrence	Noms locaux
Gravillonnaire	Gravillonnaire, sol de montagne	Proche de la montagne	Kotopounga, Moussansamou	Tampèrfa, Ditan
Caillouteux-rouge	Petit cailloux (latérite), un peu de sable, plutôt rouge	Haut de pente, bas de pente, pente, plateau	Kotopounga, Moussansamou, Sammongou, Tonri, Gonri, Pessagou,	Yarika, Kougnonkou, Tanridji, Sôwa, TémSôwa, Yarika
Sableux	Sableux, pauvre en MO	Plateau	Kotopounga, Pessagou	Wassaka, Wassama
Sablo-argileux	Sablo-argileux, plutôt jaune ou blanc (faible infiltration)	Plateau, bas-fonds, haut de pente	Kotopounga, Moussansamou, Tonri, Pessagou,	Tountaré, Koubirigou, Gnannon, Béréré
Argileux	Sol très argileux	Plateau	Moussansamou, Gonri	Didöni, TémGBANNANROU
Bas-fonds	Bas-fonds, rétention d'eau, riche en MO	Bas-fonds	Moussansamou, Sammongou, Tonri, Gonri, Pessagou,	Koupou, MONDJI, Gbannaro, TémYANNON, TémDANGOU, Bakou, Borou, Bas-fonds

5 Exemple de table de calcul des fréquences de strate

Tableau 44 – (Gauche) Exemple d'un tableau de comptage des strates de chaque quadrat de 1m² observées dans chacun des deux transects réalisés dans un carré de 900m². (Droite) Récapitulatif de la fréquence de chaque strate pour les deux transects.

Dist. (m)	Strate	
	Transect 1	Transect 2
0	1	2
1	2	2
2	2	2
3	1	4
4	1	4
5	2	3
6	1	3
7	2	4
8	2	3
9	3	5
10	3	4
11	3	3
12	2	2
13	5	3
14	5	1
15	2	2
16	2	4
17	3	2
18	2	4
19	2	4
20	2	4
21	1	5
22	2	5
23	2	5
24	2	5
25	2	5
26	2	4
27	2	4
28	2	5
29	1	4

Strate	Fréquence de chaque strate		
	Transect 1	Transect 2	Total
1	6	1	7
2	18	6	24
3	4	5	9
4	0	11	11
5	2	7	9
Somme	30	30	60

6 Aires de validation

Tableau 45 - Nombre de pixels et de polygones des aires de validation de chacune des classes

N° de classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Nombre de pixels	19322	3927	16073	8292	1663	3416	3825	10856	4096	5188	453	6351	5541	7164	1064	746	375
Nombre de polygones	28	5	15	7	5	5	6	23	8	43	17	14	10	6	6	5	3

7 Résultats d'enquêtes

7.1 Description de l'échantillon de population

Tableau 46 – Description de l'échantillon de population interrogé lors des enquêtes.

		TONRI	GONRI	KOTOPOUNGA	MOUSSASANMOU	PESSAGOU	SAMMONGOU
Personnes interrogées	<i>N</i>	32	30	30	25	30	30
Sexe :							
Femme	<i>N</i>	5	2	12	7	4	6
Homme	<i>N</i>	27	28	18	18	26	24
Age							
	μ	40.8	40.1	42.5	40.6	35.7	37.4
	σ	11.4	15	10.7	13.4	7.3	10.8
	min	25	21	25	19	26	24
	max	72	84	63	69	50	70
Niveau d'éducation :							
Aucun	<i>N</i>	18	17	16	13	19	10
Alphabétisé	<i>N</i>	1	0	0	0	1	1
Primaire	<i>N</i>	4	7	10	7	8	13
Secondaire	<i>N</i>	7	5	3	5	1	6
Supérieur	<i>N</i>	2	1	1	0	0	0
Individus par ménage :							
Total	μ	15.2	13.2	9	10.2	9.2	7.6
	σ	7	6	3.2	5.3	4.4	3.3
Adulte travaillant	μ	4.1	3	2.1	1.8	3	2.9
	σ	3.2	2.3	2	0.8	1.3	1.1
Jeune travaillant	μ	2.8	2	1.7	2.2	2.8	2.8
	σ	2.5	1.6	1.4	1.6	1.7	1.3
Enfant travaillant	μ	3.4	2.7	1.5	3.1	3	1.5
	σ	4.7	3.5	1.4	4	1.3	0.8
Type d'exploitation :							
Culture pluviale	<i>N</i>	23	16	8	1	22	16
Maraichage	<i>N</i>	2	0	0	2	0	0
Les deux	<i>N</i>	7	14	22	22	8	14
Nombre de parcelles par interrogé (culture pluviale)							
	μ	5	5.1	4.6	3	3.8	4.9
	σ	1.9	1.5	1.7	1.4	0.9	1.3
	min	1	1	1	1	3	2
	max	8	8	7	6	7	8
Transports des récoltes :							
Aucun	<i>N</i>	5	1	7	9	5	3
Vélo ou moto (uniqt.)	<i>N</i>	14	28	8	16	21	24
Vélo ou moto & Tricycle	<i>N</i>	8	1	3	0	0	3
Tricycle (uniqt.)	<i>N</i>	5	0	11	0	4	0

N : nombre de personnes ; μ : moyenne ; σ : déviation standard ; min et max : valeurs minimales et maximales ; uniqt. : uniquement.

Tableau 47 – Niveau d’instruction en fonction du sexe des personnes interrogées

Sexe	Niveau d’instruction	N	%
Femme	Aucun	28	78
	Primaire	7	19
	Secondaire	1	3
	Sous-total	36	100
Homme	Aucun	65	46
	Alphabétisé	3	2
	Primaire	42	30
	Secondaire	26	19
	Supérieur	4	3
	Sous-total	140	100
TOTAL		176	

7.2 Nombre d’observation par spéculation et par village

Tableau 48 – Nombre de spéculations* recensées par village lors des enquêtes.

	GONRI	KOTOPOUNGA	MOUSSASANMOU	PESSAGOU	SAMMONGOU	TONRI	Total
Arachide	1	8	0	5	5	1	20
Coton	3	0	0	0	0	10	13
Igname	1	6	3	0	0	0	10
Lentille	4	0	0	1	2	0	7
Maïs	28	28	23	0	3	28	110
Manioc	0	8	2	0	0	0	10
Niébé	4	4	3	4	6	5	26
Petit mil	1	11	1	3	0	0	16
Riz	10	2	0	0	1	1	14
Soja	28	12	21	11	2	26	100
Sorgho R-B**	2	10	18	2	1	8	41
Voandzou	0	6	2	5	2	0	15
Total	82	95	73	31	22	79	382

* il s’agit bien du nombre de spéculations et non pas du nombre de parcelles car certaines parcelles contiennent plusieurs spéculations. ** Sorgho rouge et blanc confondus.

Tableau 49 – Nombre de spéculations fertilisées chimiquement par village (selon les données d’enquête).

	GONRI	KOTOPOUNGA	MOUSSASANMOU	PESSAGOU	SAMMONGOU	TONRI	Total
Arachide	0	1	0	1	1	0	3
Coton	3	0	0	0	0	10	13
Igname	0	2	0	0	0	0	2
Lentille	0	0	0	1	1	0	2
Maïs	13	21	20	0	3	24	81
Manioc	0	0	0	0	0	0	0
Niébé	0	0	0	0	1	0	1
Petit mil	0	0	0	0	0	0	0
Riz	2	1	0	0	1	0	4
Soja	2	1	0	6	1	1	11
Sorgho R-B*	0	0	0	1	0	0	1
Voandzou	0	0	0	4	2	0	6
Total	20	26	20	13	10	35	124

*Rouge et blanc confondu

7.3 Détails des associations de culture par village

Tableau 50 – Associations de cultures recensées par village. Nombre (N) et superficie des parcelles. Le terme « autre » a été utilisé lors d'un oubli de l'agriculteur ou une erreur d'encodage.

Village	Association	N	Superficie [ha]
GONRI	Maïs - Soja	1	0.5
KOTOPOUNGA	Maïs - Petit mil	1	2
	Maïs - Sorgho rouge	1	2
	Maïs - Sorgho rouge - Petit mil	2	8
	Maïs - Sorgho rouge - Arachide	1	3
	Maïs - Arachide	3	2.5
	Maïs - autre	1	2
	Maïs - Niébé	2	1.5
	Maïs - Petit mil	2	2
	Sorgho rouge - Arachide	1	0.5
MOUSSASANMOU	Maïs - Petit mil	1	0.2
	Maïs - Sorgho Blanc	2	2
	Maïs - Sorgho rouge	9	11
	Maïs - Sorgho rouge - Niébé	1	1
	Maïs - Sorgho rouge - Soja	3	3
	Maïs - Soja	1	0.5
	Sorgho rouge - Niébé	1	1
PESSAGOU	Petit mil - autre	2	3.2
	Arachide - autre	4	6
	Lentille - autre	1	1.5
	Niébé - autre	3	5.5
	Pois d'angole - autre	1	2
	Soja - autre	2	6
	Voandzou - autre	4	6
SAMMONGOU	Arachide - autre	3	7.8
	Niébé - autre	5	10.8
	Sésame - autre	1	1.5
	Voandzou - autre	2	3.5
Total		61	96.5

7.4 Surface fertilisée par village

Tableau 51 – Nombre et surface de parcelle fertilisé avec l'engrais NPK par spéculation et par village.

Village	Spéculation	Parcelles fertilisées		Toutes les parcelles		Surface fertilisé [%]
		N	Surface [ha]	N	Surface [ha]	
GONRI	arachide	0	0	1	1	0
GONRI	coton	3	6	3	6	100
GONRI	lgnome	0	0	1	0.375	0
GONRI	lentille	0	0	4	1.12	0
GONRI	Maïs	13	25.8	28	49.55	52.07
GONRI	niébé	0	0	4	1.25	0
GONRI	Petit mil	0	0	1	0.5	0
GONRI	riz	2	3.25	10	9.25	35.14
GONRI	soja	3	4.45	28	72.95	6.1
GONRI	Sorgho R-B	0	0	2	1.25	0
GONRI	voandzou	0	0	0	0	0
KOTOPOUNGA	arachide	5	2.55	8	3.8	67.11
KOTOPOUNGA	coton	0	0	0	0	0

KOTOPOUNGA	Igname	2	1.5	6	4.5	33.33
KOTOPOUNGA	lentille	0	0	0	0	0
KOTOPOUNGA	Maïs	21	19.55	28	25.75	75.92
KOTOPOUNGA	niébé	2	0.55	4	2.05	26.83
KOTOPOUNGA	Petit mil	2	1.55	11	7.7	20.13
KOTOPOUNGA	riz	1	0.75	2	1.75	42.86
KOTOPOUNGA	soja	1	1	12	7.22	13.85
KOTOPOUNGA	Sorgho R-B	1	0.9	10	8.8	10.23
KOTOPOUNGA	voandzou	0	0	6	2.25	0
MOUSSASANMOU	arachide	0	0	0	0	0
MOUSSASANMOU	coton	0	0	0	0	0
MOUSSASANMOU	Igname	0	0	3	0.75	0
MOUSSASANMOU	lentille	0	0	0	0	0
MOUSSASANMOU	Maïs	23	13.844	23	13.844	100
MOUSSASANMOU	niébé	1	0.2	3	0.82	24.39
MOUSSASANMOU	Petit mil	1	0.1	1	0.1	100
MOUSSASANMOU	riz	0	0	0	0	0
MOUSSASANMOU	soja	4	1.5	21	8.85	16.95
MOUSSASANMOU	Sorgho R-B	15	6.046	18	8.396	72.01
MOUSSASANMOU	voandzou	0	0	2	1.125	0
PESSAGOU	arachide	5	3.5	5	3.5	100
PESSAGOU	coton	0	0	0	0	0
PESSAGOU	Igname	0	0	0	0	0
PESSAGOU	lentille	1	0.6	1	0.6	100
PESSAGOU	Maïs	0	0	0	0	-
PESSAGOU	niébé	2	1.6	4	3.6	44.44
PESSAGOU	Petit mil	1	0.675	3	5.175	13.04
PESSAGOU	riz	0	0	0	0	0
PESSAGOU	soja	8	13.5	11	17.5	77.14
PESSAGOU	Sorgho R-B	1	1.5	2	1.75	85.71
PESSAGOU	voandzou	4	2.2	5	2.5	88
SAMMONGOU	arachide	3	6.875	5	9.275	74.12
SAMMONGOU	coton	0	0	0	0	0
SAMMONGOU	Igname	0	0	0	0	0
SAMMONGOU	lentille	1	3	2	3.5	85.71
SAMMONGOU	Maïs	3	5.5	3	5.5	100
SAMMONGOU	niébé	6	5.45	6	5.45	100
SAMMONGOU	Petit mil	0	0	0	0	0
SAMMONGOU	riz	0	0	1	0.5	0
SAMMONGOU	soja	1	2	2	5	40
SAMMONGOU	Sorgho R-B	0	0	1	0.75	0
SAMMONGOU	voandzou	2	1.5	2	1.5	100
TONRI	arachide	0	0	1	0.5	0
TONRI	coton	10	48	10	48	100
TONRI	Igname	0	0	0	0	0
TONRI	lentille	0	0	0	0	0
TONRI	Maïs	24	153.25	28	164.25	93.3
TONRI	niébé	0	0	5	4.25	0
TONRI	Petit mil	0	0	0	0	0
TONRI	riz	0	0	1	5	0
TONRI	soja	1	7	26	120	5.83
TONRI	Sorgho R-B	0	0	8	9.875	0
TONRI	voandzou	0	0	0	0	0

Tableau 52 – Nombre et surface de parcelle fertilisé avec de l'urée par spéculation et par village.

Village	Spéculation	Parcelles fertilisées		Toutes les parcelles		Surface fertilisé [%]
		N	Surface [ha]	N	Surface [ha]	
GONRI	arachide	0	0	1	1	0
GONRI	coton	3	6	3	6	100
GONRI	lentille	0	0	4	1.12	0
GONRI	Maïs	12	22.8	28	49.55	46.01
GONRI	niébé	0	0	4	1.25	0
GONRI	riz	2	3.25	10	9.25	35.14
GONRI	soja	1	3	28	72.95	4.11
GONRI	Sorgho R-B	0	0	2	1.25	0
GONRI	Igname	0	0	1	0.375	0
GONRI	Petit mil	0	0	1	0.5	0
KOTOPOUNGA	arachide	0	0	8	3.8	0
KOTOPOUNGA	Maïs	8	8.1	28	25.75	31.46
KOTOPOUNGA	niébé	0	0	4	2.05	0
KOTOPOUNGA	riz	0	0	2	1.75	0
KOTOPOUNGA	soja	0	0	12	7.22	0
KOTOPOUNGA	Sorgho R-B	0	0	10	8.8	0
KOTOPOUNGA	voandzou	0	0	6	2.25	0
KOTOPOUNGA	Igname	0	0	6	4.5	0
KOTOPOUNGA	manioc	0	0	8	4.125	0
KOTOPOUNGA	Petit mil	0	0	11	7.7	0
MOUSSASANMOU	Maïs	19	12.744	23	13.844	92.05
MOUSSASANMOU	niébé	0	0	3	0.82	0
MOUSSASANMOU	soja	0	0	21	8.85	0
MOUSSASANMOU	Sorgho R-B	0	0	18	8.396	0
MOUSSASANMOU	voandzou	0	0	2	1.125	0
MOUSSASANMOU	Igname	0	0	3	0.75	0
MOUSSASANMOU	manioc	0	0	2	0.5	0
MOUSSASANMOU	Petit mil	0	0	1	0.1	0
PESSAGOU	arachide	1	0.5	5	3.5	14.29
PESSAGOU	lentille	1	0.6	1	0.6	100
PESSAGOU	niébé	0	0	4	3.6	0
PESSAGOU	soja	6	11.5	11	17.5	65.71
PESSAGOU	Sorgho R-B	1	1.5	2	1.75	85.71
PESSAGOU	voandzou	4	2.2	5	2.5	88
PESSAGOU	Petit mil	0	0	3	5.175	0
SAMMONGOU	arachide	1	5	5	9.275	53.91
SAMMONGOU	lentille	1	3	2	3.5	85.71
SAMMONGOU	Maïs	3	5.5	3	5.5	100
SAMMONGOU	niébé	1	1	6	5.45	18.35
SAMMONGOU	riz	1	0.5	1	0.5	100
SAMMONGOU	soja	1	2	2	5	40
SAMMONGOU	Sorgho R-B	0	0	1	0.75	0
SAMMONGOU	voandzou	2	1.5	2	1.5	100
TONRI	arachide	0	0	1	0.5	0
TONRI	coton	10	48	10	48	100
TONRI	Maïs	24	153.25	28	164.25	93.3
TONRI	niébé	0	0	5	4.25	0
TONRI	riz	0	0	1	5	0

TONRI	soja	1	7	26	120	5.83
TONRI	Sorgho R-B	0	0	8	9.875	0

Tableau 53 – Nombre et surface de parcelle fertilisé par amendement organique par spéculation et par village.

Village	Spéculation	Parcelles fertilisées		Toutes les parcelles		Surface fertilisé [%]
		N	Surface [ha]	N	Surface [ha]	
GONRI	arachide	0	0	1	1	0
GONRI	Maïs	1	4	28	49.55	8
GONRI	niébé	0	0	4	1.25	0
GONRI	Petit mil	0	0	1	0.5	0
GONRI	soja	0	0	28	72.95	0
GONRI	Sorgho R-B	0	0	2	1.25	0
GONRI	coton	0	0	3	6	0
GONRI	Igname	0	0	1	0.375	0
GONRI	lentille	0	0	4	1.12	0
GONRI	riz	0	0	10	9.25	0
KOTOPOUNGA	arachide	2	0.75	8	3.8	20
KOTOPOUNGA	Maïs	6	3.55	28	25.75	14
KOTOPOUNGA	niébé	0	0	4	2.05	0
KOTOPOUNGA	Petit mil	2	1.35	11	7.7	18
KOTOPOUNGA	soja	0	0	12	7.22	0
KOTOPOUNGA	Sorgho R-B	1	0.6	10	8.8	7
KOTOPOUNGA	Igname	0	0	6	4.5	0
KOTOPOUNGA	manioc	0	0	8	4.125	0
KOTOPOUNGA	riz	0	0	2	1.75	0
KOTOPOUNGA	voandzou	0	0	6	2.25	0
MOUSSASANMOU	Maïs	0	0	23	13.844	0
MOUSSASANMOU	niébé	0	0	3	0.82	0
MOUSSASANMOU	Petit mil	0	0	1	0.1	0
MOUSSASANMOU	soja	1	0.25	21	8.85	3
MOUSSASANMOU	Sorgho R-B	0	0	18	8.396	0
MOUSSASANMOU	Igname	0	0	3	0.75	0
MOUSSASANMOU	manioc	0	0	2	0.5	0
MOUSSASANMOU	voandzou	0	0	2	1.125	0
PESSAGOU	arachide	0	0	5	3.5	0
PESSAGOU	niébé	0	0	4	3.6	0
PESSAGOU	Petit mil	0	0	3	5.175	0
PESSAGOU	soja	1	1.2	11	17.5	7
PESSAGOU	Sorgho R-B	1	1.5	2	1.75	86
PESSAGOU	lentille	0	0	1	0.6	0
PESSAGOU	voandzou	0	0	5	2.5	0
SAMMONGOU	arachide	1	1.5	5	9.275	16
SAMMONGOU	Maïs	0	0	3	5.5	0
SAMMONGOU	niébé	1	0.3	6	5.45	6
SAMMONGOU	soja	0	0	2	5	0
SAMMONGOU	Sorgho R-B	0	0	1	0.75	0
SAMMONGOU	lentille	0	0	2	3.5	0
SAMMONGOU	riz	0	0	1	0.5	0
SAMMONGOU	voandzou	0	0	2	1.5	0
TONRI	arachide	0	0	1	0.5	0
TONRI	Maïs	2	15.5	28	164.25	9
TONRI	niébé	0	0	5	4.25	0

TONRI	soja	1	6	26	120	5
TONRI	Sorgho R-B	1	2	8	9.875	20
TONRI	coton	0	0	10	48	0
TONRI	riz	0	0	1	5	0

7.5 Comparaison des rendements déclarés aux statistique de la FAO

Tableau 54 – Comparaison entre les rendements moyens calculés par la FAO (moyenne de 2010 à 2020 à l'échelle nationale) et les rendements moyens déclarés dans la zone d'étude.

Spéculation	Rendement moyen [t/ha]		Rapport
	Bénin (FAO)*	Déclaré	Fao/déclaré
Coton	1.02	1.07	0.95
Maïs	1.30	1.20	1.09
Soja	1.04	0.80	1.30
Petit mil	0.89	0.57	1.56
Arachide	0.92	0.57	1.62
Sorgho R-B	1.11	0.64	1.73
Riz	3.50	1.78	1.97
Igname	14.24	2.38	5.98
Manioc	13.83	1.45	9.55

* (FAOSTAT, 2022)

8 Détails supplémentaire sur les bilans de nutriments

8.1.1 Scénario 2

Tableau 55 – Bilans partiels, bilans complets et NuUE pour d'azote et de phosphore du scénario 2. Les noms des termes sont indiqués à gauche du tableau et les unités relatives à chaque ligne sont à droite (BNF = fixation d'azote biologique).

Spéculation		Soja		Maïs		Coton		Riz		
Surface		761		925		162		9		[ha]
Nutriment		N	P	N	P	N	P	N	P	
INPUT	Minéral	1.3	0.3	11.9	2.8	54.4	16.7	5.6	1.8	[kg/ha]
	Organique	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Déposition	7.9	1.0	7.9	1.0	7.9	1.0	7.9	1.0	
	BNF	56.0	0.0	3.7	0.0	3.7	0.0	3.7	0.0	
OUTPUT	Produits	62.5	5.0	11.8	2.4	31.1	5.7	23.2	4.5	[kg/ha]
	Résidus	16.3	4.0	32.5	5.9	5.5	0.8	10.6	1.4	
	Lixiviation	0.0	0.0	4.1	0.0	22.5	0.0	13.6	0.0	
	Emission gaz	1.0	0.0	2.0	0.0	5.0	0.0	1.9	0.0	
BILAN	Partiel	-77.6	-8.7	-32.4	-5.6	17.7	10.2	-28.1	-4.1	[kg/ha]
	Complet	-14.7	-7.7	-26.8	-4.5	1.9	11.3	-31.9	-3.0	
	Partiel	-59.03	-6.62	-29.96	-5.14	2.87	1.66	-0.26	-0.04	[Mg]
	Complet	-11.19	-5.83	-24.79	-4.18	0.31	1.83	-0.29	-0.03	
NuUE		49.8	14.7	1.0	0.9	0.6	0.3	4.1	2.4	[-]

8.1.2 Scénario 2.1

Le scénario 2.1 correspond au scénario 2 si les doses appliquées par certains agriculteurs actuellement (calculées au point IV1.3) étaient appliquées sur 100 % des surfaces et non pas sur une partie des surfaces seulement (calculée à la section IV1.3.1).

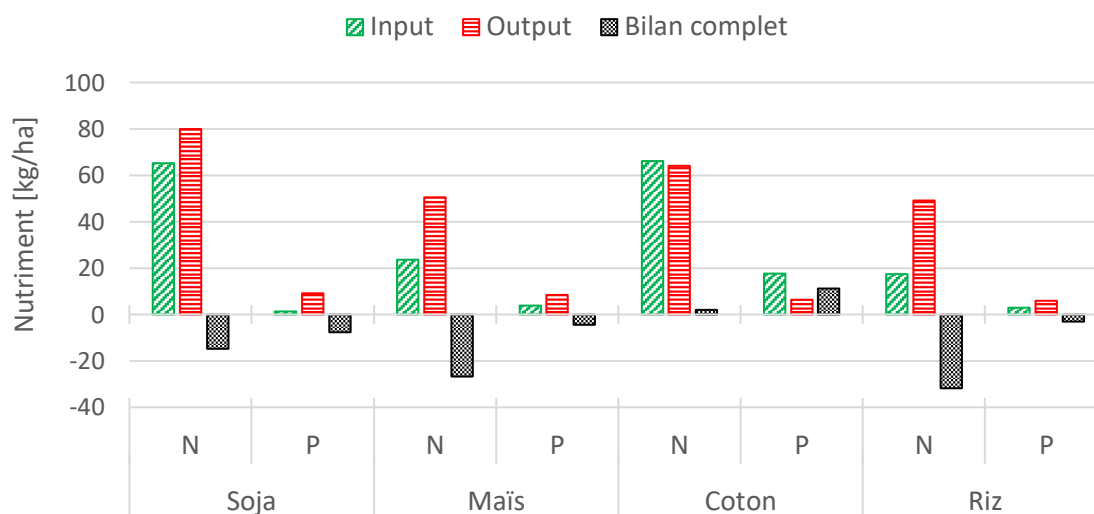


Figure 46 – Représentation simplifiée du bilan complet du scénario 2.1.

Tableau 56 - Bilans complets des spéculations en déficit, apport potentiel de nutriment par le bétail, et bilan global (pour le scénario 2.1). Les « bilan-100 » et « bilan-50 » correspondent aux bilans où, respectivement, 100 et 50 % des déjections animales seraient récupérées et apportées aux cultures en déficit.

	Bilan complet [Mg]	
	N	P
Soja	0.0	-1.8
Maïs	-19.7	-1.8
Coton	0.0	0.0
Riz	-0.2	0.0
Déficit total	-19.8	-3.6
Apport du bétail (100%)	32.9	10.1
Bilan – 100	13.0	6.5
Apport du bétail (50%)	16.4	5.0
Bilan – 50	-3.4	1.4

8.1.3 Scénario 3

Tableau 57 – Bilans partiels, bilans complets et NuUE d'azote et de phosphore du scénario 3. Les noms des termes sont indiqués à gauche du tableau et les unités relatives à chaque ligne sont à droite (BNF = fixation d'azote biologique).

	Spéculation	Soja		Maïs		Coton		Riz		
	Surface	761		925		162		9		[ha]
	Nutriments	N	P	N	P	N	P	N	P	
INPUT	Minéral	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Organique	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	[kg/ha]
	Déposition	7.9	1.0	7.9	1.0	7.9	1.0	7.9	1.0	
	BNF	56.0	0.0	3.7	0.0	3.7	0.0	3.7	0.0	
OUTPUT	Produits	62.5	5.0	11.8	2.4	31.1	5.7	23.2	4.5	
	Résidus	16.3	4.0	32.5	5.9	5.5	0.8	10.6	1.4	[kg/ha]
	Lixiviation	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	
	Emission gaz	1.0	0.0	2.0	0.0	5.0	0.0	1.9	0.0	
BILAN	Partiel	-78.8	-9.0	-44.3	-8.3	-36.7	-6.4	-33.7	-5.9	[kg/ha]
	Complet	-16.0	-8.0	-34.6	-7.3	-30.0	-5.4	-36.0	-4.8	
	Partiel	-59.99	-6.88	-40.94	-7.72	-5.93	-1.04	-0.31	-0.05	[Mg]
	Complet	-12.15	-6.09	-31.96	-6.76	-4.86	-0.88	-0.33	-0.04	
	NuUE	-	-	160.8	183.2	-	-	-	-	[-]

Tableau 58 – Détails des calculs pour la surface de savane nécessaire pour combler le déficit du scénario 3.

Nutriments...	N	P	Unité *
... prélevable des savanes H.	34.2	2.6	kg/ha
...restituable en déjection	13.7	2.2	kg/ha
...récupérable (50%)	6.8	1.1	kg/ha
Surface de s.h. pour 1kg de nutriment	0.15	0.89	ha/kg
Surface de s.h. pour combler le déficit	4818	8004	ha
Pourcentage de la surface actuelle de s.h.	645	1071	%

. * en ha de savane herbeuse ; s.h. = savane herbeuse

9 Précipitation et NDVI de l'Atacora

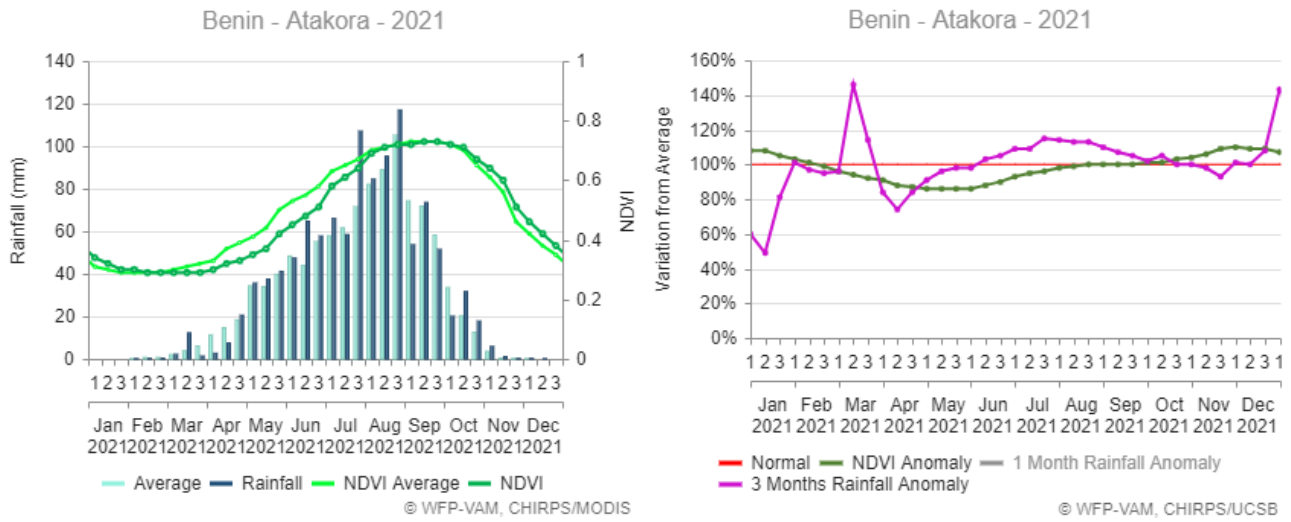


Figure 47 – Statistiques sur les précipitations et le NDVI pour la zone d'étude. A gauche, données observées et moyenne sur 30 ans. A droite, anomalie observée pour 2021 (WFP, 2021a).

L'agroécologie offre-t-elle une solution viable à l'échelle du terroir ? Analyse détaillée des réservoirs et flux de matière organique dans la région de l'Atacora au Bénin

François Greiner, Tom Kenda

Résumé

L'agroécologie est de plus en plus souvent proposée comme réponse aux défis actuels. L'Afrique subsaharienne, en particulier, fait face à de nombreux défis tels que la sous-alimentation, une forte croissance démographique, une vulnérabilité accrue aux changements climatiques et une dégradation des terres importante.

La pratique de l'agroécologie requiert néanmoins l'utilisation de matières organiques (compost, fumier, résidus de culture, etc.) pour remplacer partiellement ou totalement les engrais minéraux et entretenir la qualité des sols. Dès lors, l'objectif de ce mémoire est de quantifier les ressources organiques potentiellement valorisables dans la région de l'Atacora au Bénin, afin d'estimer si elles sont présentes en quantités suffisantes.

Une campagne de terrain a été menée entre juillet et septembre 2021, afin de réaliser des enquêtes, collecter des points GPS et prélever des échantillons de biomasse. La méthodologie a ensuite consisté à combiner l'utilisation de la télédétection avec des bilans de nutriments.

L'acquisition d'images satellites Pléiades a permis de produire une cartographie de l'occupation du sol du village de référence à 0.5 m de résolution spatiale. L'exactitude globale (58 %) de cette cartographie à 10 classes est cependant mitigée. Des propositions de méthodologies alternatives sont dès lors suggérées pour l'étude des autres villages.

Ensuite, plusieurs bilans de nutriments (azote et phosphore) suivant différents scénarios de gestion de la fertilité ont été développés. Ceux-ci utilisent la cartographie, les enquêtes et les échantillonnages comme principales sources de données. Le système agricole actuel présente un bilan plutôt négatif, même si l'on considère un apport important de nutriment des savanes du terroir par le bétail. La suppression totale des engrais minéraux semble donc difficilement envisageable.

Dans une perspective de promotion de l'agroécologie à l'échelle du terroir, une solution viable serait de combiner une fertilisation minérale raisonnée et pratiquée par l'ensemble des agriculteurs, avec une restitution maximale des déjections animales vers les champs. La bonne gestion des résidus de cultures, sans brûlage, est aussi importante pour éviter les pertes.

Finalement, différentes propositions ont été faites pour améliorer la méthodologie et affiner les estimations, en vue d'analyser les autres villages de la zone d'étude.

Mots clés : agroécologie, Afrique de l'Ouest, bilan de nutriment, télédétection, matière organique