Etude d'impact des cultures fourragères sur le bilan carbone des systèmes de pâturage de bovin dans la région Boeny

Novembre 2023

TABLE DES MATIÈRES

RESUME EXECUTIF viii
1 INTRODUCTION ET CONTEXTE 1
2 ZONE D'ETUDE 2
2.1 Localisation 2
2.2 Climat 2
2.3 Pédologie 3
2.4 Occupation de sol 5
3 DEMARCHE METHODOLOGIQUE 5
3.1 Phase préparatoire 5
3.2 Identification des parties prenantes 6
3.3 Collecte de données 6
3.3.1 Prélèvement de sol 6
3.3.2 Entretiens aux niveaux des parties prenantes 7
3.3.2.1 Caractéristiques du système de pâturage 8
3.3.2.2 Identification des impacts et risques climatiques (Risque) 9
3.3.2.3 Détermination de danger et les impacts immédiats (Danger) 9
3.3.2.4 Détermination de la vulnérabilité 10
3.3.2.5 Détermination de l'exposition 10
3.3.2.6 Conduite de réflexion collective sur les mesures d'adaptation 11
3.3.3 Outils de collecte de données 11
3.4 Traitement et analyse de données 12
3.4.1 Evaluation de la relation entre le carbone organique du sol par la méthode de perte au feu (Loss of Ignition) et les pratiques de pâturage 12
3.4.2 Evaluation de la vulnérabilité du système de pâturage au changement climatique 13
3.4.3 Evaluation de la contribution du système de pâturage au changement climatique par le bilan carbone 13
3.4.3.1 Estimation des variations des stocks de carbone des pâturages 13
3.4.3.2 Estimation des émissions de GES du système de pâturage 15
3.4.3.3 Estimation du bilan carbone équivalent du système de pâturage 16
3.4.4 Evaluation de la teneur en éléments principaux dans le sol (Azote total, Phosphore, Potassium) par système de pâturage 16
4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS 17
4.1 Relation entre le carbone organique du sol par la méthode de perte au feu et les pratiques de pâturage 17
4.2 Vulnérabilité du système de pâturage au changement climatique 18

4.2.1 Caractéristiques de système de pâturage dans la région Boeny 18
4.2.1.1 Profils des propriétaires des zébus 18
4.2.1.2 Type d'alimentation des zébus 19
4.2.1.3 Mode de conduite des troupeaux (adapté de Burnod et al, 2021) 19
4.2.2 Risques liés au changement climatique (chaines d'impacts) sur le système de pâturage 21
4.2.2.1 Risques climatiques (Risque) du système de pâturage 23
4.2.2.2 Danger et impacts immédiats (Danger) sur le système de pâturage 23
4.2.2.3 Vulnérabilité du système de pâturage 24
4.2.2.4 Facteurs de l'exposition du système pâturage 24
4.2.2.5 Mesures d'adaptation 25
4.3 Contribution du système de pâturage au changement climatique par le bilan carbone 25
4.3.1 Variation des stocks de carbone dans le système de pâturages 25
4.3.1.1 Variation de stocks de carbone des savanes indigènes 26
4.3.1.2 Variation de stocks de carbone (COS) des pâturages améliorés 26
4.3.2 Emissions de GES du système de pâturage 28
4.3.3 Bilan carbone équivalent du système de pâturage 29
4.4 Modélisation des scénarii d'inaction et d'action liées aux cultures fourragères 30
4.4.1 Modélisations des scénarii d'inaction avec pâturage traditionnel fortement dégradé 30
4.4.2 Modélisation d'un scénario d'augmentation de superficie de culture fourragère 31
4.4.3 Evolution des bilans carbone (en t $CO_{2éq}$ /ha/an) par scénarii d'action et d'inaction pour les pâturages traditionnels 32
4.4.4 Evolution des bilans carbone (en t $CO_{2éq}$ /ha/an) par scénarii d'action et d'inaction pour le système pâturage actuel dans les zones d'interventions 33
4.4.5 Evolution des bilans carbone (en t $CO_{2éq}$ /ha/an) par scénarii d'inaction sur le système de pâturage amélioré 34
4.5 Teneur en éléments principaux dans le sol (Azote total, Phosphore, Potassium) par type de pâturage 35
4.5.1 Azote total du sol par type de pâturage 35
4.5.2 Phosphore du sol par type de pâturage 35
4.5.3 Potassium du sol par type de pâturage 36
5 DISCUSSIONS 37
5.1 Discussion sur la relation entre le carbone organique du sol et les pratiques de pâturage 37
5.2 Discussion sur le bilan carbone dans le système de pâturage 38
5.3 Discussion sur les teneurs en éléments minéraux 38
5.3.1 Teneur en azote totale du sol 38
5.3.2 Teneur en phosphore du sol 38

5.3.3 Teneur en potassium du sol 39
6 RECOMMANDATIONS 39
6.1 Recommandations sur le bilan carbone et le système de pâturage 39
6.2 Recommandations sur la teneur en éléments principaux dans le sol du système de pâturage 40
6.2.1 Azote totale du sol 40
6.2.2 Phosphore du sol 41
6.2.3 Potassium du sol 42
7 CONCLUSION 42
REFERENCES 44
ANNEXES I

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Note d'adaptation relative au développement de la chaîne d'impact selon le concept de l'AR5 du GIEC (Module 2) I
Annexe 2 : Guide d'entretien "Acteurs ressources" VII
Annexe 3 : Méthode de prélèvement d'échantillon pour le stock de COS XXII

LISTE DES EQUATIONS

Équation 1: Formule de la Densité apparente (Da) 13
Équation 2: Formule du carbone organique du sol (COS) 13
Équation 3: Variation des stocks de carbone des sols 14
Équation 4: Variation annuelle pour la biomasse vivante 15
Équation 5: Emission de méthane due à la fermentation entérique 15

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la zone d'étude 2
Figure 2: Diagramme ombrothermique et Régime éco-climatique régional 3
Figure 3: Carte pédologique de la région Boeny issue de 12 variables environnementales 4
Figure 4: Occupation du sol de la région Boeny en 2018 5
Figure 5: Forme de placette et prélèvement de l'échantillon du sol 7
Figure 6: Structure d'une chaine d'impact selon l'approche de l'AR5 du GIEC. Vue d'ensemble générale du concept (partie supérieure de la figure) et de la structure détaillée (partie inférieure) 11
Figure 7: carte de répartition du système de pâturage dans la Région Boeny 12
Figure 8: Synthèse de l'approche méthodologique 17
Figure 9 : Comparaison de taux de carbone organique du sol sous savanes indigènes et sous fourrages améliorés 18
Figure 10: Des zébus de trait cantonnés aux espaces de proximité (cultivés ou en herbe) (Source : Burnod et al, 2021) 19
Figure 11: Aomby asesy entre terrains de cultures villageois et pâturages éloignés (Source : Burnod et al, 2021) 20
Figure 12: « Aomby tondraka » laissés dans les pâturages éloignés jours et nuits sans surveillance (Source : Burnod P al, 2021) 20
Figure 13: Indicateur de vulnérabilité et d'exposition pour le risque de pénurie de fourrage pour les éleveurs de bovins 22
Figure 14: Stock de carbone équivalent du système de pâturage 28
Figure 15: Bilan carbone équivalent du système pâturage (utilisation de 3,76% de fourrage amélioré) 29
Figure 16: Bilan carbone équivalent du système pâturage scénario d'inaction jusqu'en 2030 31
Figure 17: Bilan carbone équivalent du système pâturage scénario d'inaction jusqu'en 2050 31
Figure 18: Bilan carbone équivalent du système pâturage scénario d'inaction jusqu'en 2080 31
Figure 19: Bilan carbone équivalent du système pâturage avec une augmentation de 2% par an de superficie de culture fourragère jusqu'à 2030 32
Figure 20: Bilan carbone équivalent du système pâturage avec une augmentation de 10% par an de superficie de culture fourragère jusqu'à 2030 32
Figure 21: Evolution de bilan carbone équivalent en t $CO_{2éq}$ /ha/an pour utilisation de 100% fourrage traditionnel (inaction) et augmentation de fourrage amélioré de 2% et 4%(action) 33
Figure 22: Evolution du bilan carbone équivalent en t $CO_{2éq}$ /ha/an du système pâturage (utilisation de 3,76% de fourrage amélioré) 34
Figure 23: Evolution des bilans carbone (en t CO2éq /ha/an) par scénarii d'inaction du système de pâturage (100%) amélioré 34

Figure 24 : Comparaison de la concentration en azote total dans les sols sous savanes indigènes et sous fourrages améliorés 35
Figure 25 : Comparaison des masses de phosphore dans les sols sous pâturage traditionnel et sous pâturage amélioré 36
Figure 26 : Comparaison des teneurs en potassium dans les sols sous pâturage traditionnel et sous pâturage amélioré 36
Figure 27 : Comparaison des masses de carbone dans les sols sous pâturage traditionnel avec d'autres études 37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Identification des parties prenantes 6
Tableau 2: Caractéristiques du système de pâturage dans la région Boeny 8
Tableau 3: Mode de conduite de troupeau pendant la saison sèche 8
Tableau 4: Facteurs de variation de stocks de carbone relatifs pour la gestion des pâturages à régime climatique tropical 14
Tableau 5: Mode de conduite de troupeau et le nombre de zébu dans chaque commune d'intervention 21
Tableau 6: Caractéristiques du système de pâturage et bilan carbone 29

LISTE DE ACRONYMES

% :	Pourcentage
$\Delta CPP_{Minéraux}$:	Variation annuelle des stocks de carbone des sols minéraux
°C :	degré Celsius
AR5 :	« Fifth Assessment report »
B_{t1} :	Biomasse au point temporel t_1 , en t m.s.
B_{t2} :	Biomasse au point temporel t_2, en t m.s.
C :	Carbone
Ca :	Calcium
Cf.	« Conferre » ou se référer à
CH_4 :	Méthane
cm :	Centimètre
CO_2 :	Dioxyde de carbone
$CO_{2éq}$:	Carbone équivalent
COS :	Carbone organique du sol
$COS_{(0-T)}$:	Stocks de carbone organique des sols T années avant l'inventaire
COS_0 :	Stocks de carbone organique des sols pour l'année d'inventaire
COS_{ref} :	Carbone organique du sol de référence
D_a :	Densité apparente
DRAE :	Direction Régionale de l'Agriculture et de l'Elevage
ESSA :	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
F_A :	Facteur de variation des stocks pour l'apport de matière organique
FC :	Fraction de C de la matière sèche
FOFIFA :	**«** FOibem-pirenena momba ny FIkarohana ampiharina amin'ny Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra» ou Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural
F_{RG} :	Facteur de variation des stocks pour le régime de gestion
F_{UT} :	Acteur de variation des stocks pour le type d'utilisation des terres ou changement d'affectation des terres
g C/kg :	Gramme de carbone par kilogramme
g K/kg :	Gramme de potassium totale kilogramme
g N/kg :	Gramme d'azote totale par kilogramme
g P/kg :	Gramme de phosphore totale par kilogramme
g/animal/jour :	Gramme par animal par jour
g/kg :	Gramme par kilogramme
GES :	Gaz à Effet de Serre
Gg CH_4 /an :	Gigagramme de Méthane par an
Gg $CO_{2éq}$:	Gigagramme de Carbone équivalent
Gg :	Gigagramme
GIEC :	Groupe des experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GPS :	« Global Positioning System » ou Géo-positionnement par satellite
GT :	Groupe de travail
ha :	Hectare
K :	Potassium
kg CH_4 /tête/an :	Kilogramme de méthane par tête par an
kg N/ha/an :	Kilogramme d'azote par hectare par an
LLandDev Tech :	Land, Landscape and Development Technologies
LOI :	« Loss on Ignition » ou perte en feu
Mg :	Magnésium
MinEl :	Ministère de l'Elevage

MODIS : « Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer » ou Radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne

N : Azote

NDVI : « Normalized Difference Vegetation Index » ou Indice de végétation par différence normalisée

N_2O : Oxyde nitreux

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

P : Phosphore

PA : Pâturage Amélioré

PLOF : Plan local d'occupation foncière

ProSol : Projet mondial de « Protection et réhabilitation des sols pour améliorer la sécurité alimentaire »

RCP2.6 : « Representative Concentration Pathway » ou « Trajectoires représentatives de concentration », un scénario de trajectoire du forçage radiatif de 2,6 W/m^2 (Watt par mètre carré) jusqu'à l'horizon 2100.

RCP6.0 : « Representative Concentration Pathway » scénario de trajectoire du forçage radiatif de 6 W/m^2 jusqu'à l'horizon 2100.

RCP7.0 : « Representative Concentration Pathway » scénario de trajectoire du forçage radiatif de 7 W/m^2 (Watt par mètre carré) jusqu'à l'horizon 2100.

RFE : « RainFall Estimate »

RN4 : Route Nationale numéro 4

S : Superficie de chaque parcelle, en ha

S/O : Sans Objet

SIG : Système d'Information Géographique

sp. : « Species singular »

spp. : « Species pluralis »

t : Tonne

t C : Tonne de Carbone

t C (t m.s.)$^{-1}$: Tonne de carbone par tonne de matière sèche

t C an^{-1} : Tonne de Carbone par an

t C ha^{-1} : Tonne de Carbone par hectare

t $CO_{2éq}$ /ha/an : Tonne de Carbone équivalent par hectare par an

t m.s. an^{-1} : Tonne de matière sèche par an

t m.s. ha^{-1} : Tonne de matière sèche par hectare

t m.s. : Tonne de matière sèche

T : Période d'inventaire, en années

UBT/ha : Unité de Bétail Tropical par hectare

VOI : « Vondron'Olona Ifotony » ou communauté de base

ΔB : Variation annuelle pour la biomasse vivante

$\Delta B_{herbacées\ graminées}$: Variation de la biomasse souterraine d'herbacées graminées

ΔB_{vivace} : Variation de la biomasse ligneuse vivace aérienne et souterraine

$\Delta CPP_{BV(c,i,g)}$: Variation des stocks de carbone de la biomasse vivante pour un type spécifique de prairies i, zone climatique c, et régime de gestion g

RESUME EXECUTIF

Le changement climatique est un enjeu politique mondial et touche également le système de pâturage à Madagascar. Dans la région Boeny, l'élevage bovin de type extensif à base de pâturage naturel occupe une place importante pour la population. Ce système pâturage court un risque de pénurie de fourrage pour les éleveurs de bovins. L'analyse avec les acteurs clés a permis d'évaluer la vulnérabilité des exploitations, la dimension d'adaptation en étudiant les préférences des agriculteurs, les postes sources et stock de carbone, les flux de ressources et les modes de gestion du système pâturage. Des analyses de sols et des entretiens ont été effectuées à la fois à cet effet. La méthodologie adoptée suit le concept de risque climatique développé dans l'AR5 du GIEC (GIZ et EURAC, 2017) avec les composantes risque, danger, vulnérabilité, exposition et mesures d'adaptation. Pour l'évaluation de la contribution du système pâturage au changement climatique par le bilan carbone, le stock de carbone organique du sol (COS) et les émissions des méthanes imputables au bétail ont été analysés puis modélisés dans le cas d'une prise d'action. Les résultats ont montré le potentiel de stockage de carbone dans le sol de l'élevage bovin associé à des surfaces en fourrage. Les sols sous pâturages traditionnels présentent une masse de carbone significativement inférieure par rapport aux sols sous pâturages améliorés. Ce dernier est associé au système et intervient ainsi comme un phénomène de compensation aux émissions de GES qui rend le bilan carbone positif. A cet égard, pour le système de pâturage composé par 96,24% de pâturage indigène avec une régime de gestion de pâturage moyennement dégradé et 3,76% de fourrages améliorés, le bilan carbone équivalent est positif de l'ordre de 28,43 Gg CO2éq /an entre les années 2022 et 2023. Cependant, le climat et le feu sont des facteurs majeurs entrainant la dégradation progressive des pâturages indigènes et pourraient influer sur les risques actuels et futurs permettant au bilan d'être négatif de l'ordre de -17,65 t CO2éq /ha par an jusqu'en 2080. L'action à envisager consiste ainsi à augmenter les surfaces de culture fourragère améliorée d'après les scénarios proposés. En effet, une augmentation de 2% à 10% par an de surface de culture fourragères mène à une compensation respective de 26,03 à 46,77 t CO2éq /ha par an jusqu'en 2030. Concernant la teneur en éléments minéraux du sol, le taux d'azote totale et de phosphore du sol sous pâturages traditionnels et améliorés sont identiques. Cependant, les pâturages améliorés enrichissent le sol en azote à long terme. Pourtant, le taux de potassium est significativement différent entre ces deux types de pâturage avec un taux supérieur pour les pâturages améliorés. En connaissant ces mécanismes, il est possible d'optimiser les pratiques agricoles pour une séquestration plus efficace du carbone et une optimisation du recyclage et/ou de l'enrichissement en éléments minéraux du sol. En plus, il a été démontré que les espèces fourragères, principalement *Brachiaria sp* et *Stylosanthes sp*, ont un fort potentiel de fixation de carbone dont le système n'est pas sujet au compensation globale mais pour qu'il ne devienne pas une source d'émission de gaz à effet de serre. De ce fait, il est recommandé d'encourager l'adoption durable de pâturages améliorés avec accompagnement technique et incitation financière pour faciliter la transition ; et de réduire la fréquence ou la prévention des feux pour augmenter la biomasse moyenne des sols, ainsi que la densité des espèces locales. De plus, il est nécessaire d'allouer des ressources supplémentaires à la recherche et au développement de nouvelles approches comme l'adoption d'autres systèmes dont la sédentarisation avec des races améliorées de zébu pour maximiser les bénéfices environnementaux et agricoles de ces pâturages améliorés. Il est également nécessaire de poursuivre la recherche dans ce domaine afin de mieux comprendre les mécanismes d'apport que le système pâturage peut apporter sur le revenu des paysans. En parallèle, il est essentiel d'entreprendre ces actions pour fournir aux décideurs des informations de bases qui pourraient être utiles dans un processus de gestion du système pâturage avec les lignes d'action à mettre en œuvre dans une note politique produite à cet égard.

1 INTRODUCTION ET CONTEXTE

L'élevage occupe une place importante dans la vie culturelle, sociale et économique de Madagascar tout en étant une deuxième activité de la majeure partie du monde rural malgache après l'agriculture. Il joue un rôle important dans la sécurité alimentaire et la lutte contre la pauvreté. Près de 70% des ménages malagasy et 3/4 des ménages en milieu rural s'intéressent à cette activité. L'élevage des bovins, constitué à 85% de zébus malagasy, occupe une place prépondérante dans le secteur de la production animale et se concentre dans les parties nord-ouest, la côte ouest et l'extrême sud de l'île (MinEL, 2015).

Dans la partie nord-ouest, la Région Boeny regroupe plus de 35% du cheptel bovin qui constitue une des activités pratiquées par la majorité de la population. L'élevage bovin, de type extensif à base de pâturage naturel, occupe une place prépondérante dans le secteur de production animale dans la région. Toutefois, le manque de fourrage pendant la saison sèche ajouté aux feux de brousses fréquents pour compenser ces besoins constituent des obstacles à son développement et donc au développement agricole de la région.

Face à ces problématiques, le projet ProSol ambitionne la protection et la réhabilitation de sols gravement touchés ou menacés par la dégradation dans cette région dont plusieurs hectares sont constitués par des pâturages. Parmi ses actions, l'Action ProSilience cofinancée par l'Union Européenne, depuis 2021, entend renforcer la transition agroécologique vers des systèmes agroalimentaires durables avec les dimensions adaptations et atténuations au changement climatique dont l'amélioration de la gestion des pâturages surtout en saison sèche. Dans ce sens, ProSol a mis en place des sites de démonstration de cultures fourragères en collaboration étroite avec les éleveurs, pour contribuer à l'amélioration alimentaire des ruminants et à la restauration du sol dans la Région de Boeny.

La présente étude, sur l'« Etude d'impact des cultures fourragères sur le bilan carbone des systèmes de pâturage de bovin dans la Région Boeny » réalisée par LLandDev Tech, permet d'évaluer l'impact de ce nouveau système en termes de séquestration de carbone. Elle vise principalement à « *évaluer la relation entre les différents systèmes de pâturage et le changement climatique dans la région de Boeny* ». Pour atteindre cet objectif, trois objectifs spécifiques y découlent à savoir :

(i) Évaluer la vulnérabilité de différents systèmes de pâturage au changement climatique par l'approche suivant la méthode développée dans le rapport d'évaluation du GIEC ;
(ii) Évaluer la contribution des systèmes au changement climatique par le biais de l'élaboration de bilan Carbone et
(iii) Déterminer les postes sources et puits de GES au niveau du système de pâturage et le présenter sous forme de carte ou de schéma.

Pour ce faire, il est essentiel de connaitre les risques liés au changement climatique qui pèsent sur les différents systèmes de pâturage proposés, les sources majeures d'émission de GES dans ces systèmes, la séquestration de carbone efficace selon la pratique de pâturage (culture fourragère ou savane indigène), la variété la plus adaptée dans une stratégie d'atténuation des émissions de GES (et d'intensification des systèmes d'élevage) et le bilan carbone dû à l'utilisation de ces systèmes fourragères dans l'élevage bovin.

La finalité du projet cible un nombre important de bénéficiaires dont les bénéficiaires directs sont l'ensemble des Ministères sectoriels au niveau national et régional. Ils jouiront d'une meilleure compréhension du système de pâturage face au changement climatique afin de mieux orienter les politiques et les stratégies sectorielles.

2 ZONE D'ETUDE

2.1 Localisation

L'étude est réalisée dans la Région de Boeny qui est délimitée au Nord par la Région Sofia, à l'Est par la Région Betsiboka et au Sud par la Région Melaky. Elle est composée de six Districts dont Mahajanga I comme chef-lieu de région, Mahajanga II au Nord, Soalala à l'extrême Sud-Ouest, Mitsinjo à l'Ouest, Marovoay au Centre-Sud et Ambato Boeny à l'Est.

Le choix de cette région se base surtout par le fait qu'elle est la principale zone d'intervention du projet ProSol à Madagascar. Les parcelles étudiées ont été réparties dans 4 communes dont Antanambao Andranolava, Belobaka, Katsepy et Tsaramandroso (cf. figure 1). Ces communes sont choisies de par leur accessibilité, la présence des éleveurs en relation avec le projet ProSol sachant appliquer leur technique d'élevage et surtout ceux adoptant la technique de culture fourragère.

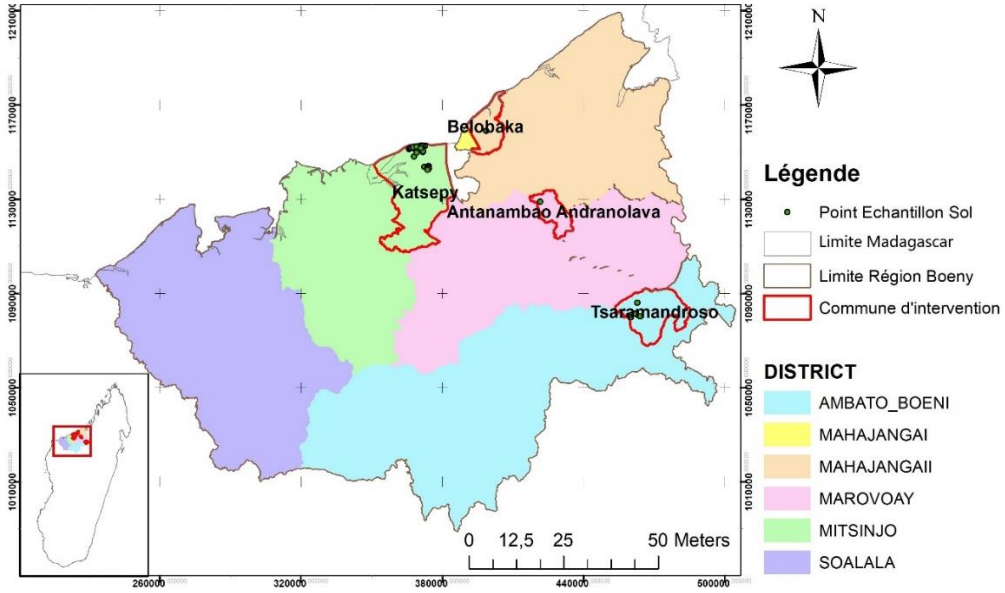


Figure 1: Localisation de la zone d'étude

2.2 Climat

Le climat de la Région est tropical semi-humide à hiver sec (Aw) selon la classification de Köppen-Geiger, fortement influencé par la mousson avec une alternance de saison sèche (maintany) s'étalant de mai à octobre avec une température moyenne de 24 à 27°C et de saison pluvieuse (asara), de novembre à avril avec une température moyenne de 28°C. La température moyenne annuelle est de 26,9 °C. Les précipitations moyennes de l'année sont de 1306,2 mm.

La Région Boeny n'est pas une zone cyclonique. La plupart des cyclones qui touchent Madagascar viennent de l'Océan Indien. Ils arrivent sur Boeny déjà affaiblis par la traversée d'une partie de l'île, apportant de fortes précipitations et inondations, mais ne sont plus accompagnés de vents violents dévastateurs (METEO et CLIMAT, 2023). Néanmoins, les inondations peuvent avoir des impacts très prononcés surtout sur les zones alluviales basses comme lors du cyclone Cheneso en Janvier 2023.

Le diagramme ombrothermique moyen entre 1961 à 1990 est calculé par l'OMM à la station côtière de Mahajanga, et le régime éco-climatique décadaire moyen (Rainfall Estimate-RFE, NDVI et nombre de feux) est calculé avec les données satellitaires MODIS à l'échelle régionale sur la période de 2001 à 2016 (Bigot et al, 2018) (cf. figure 2).

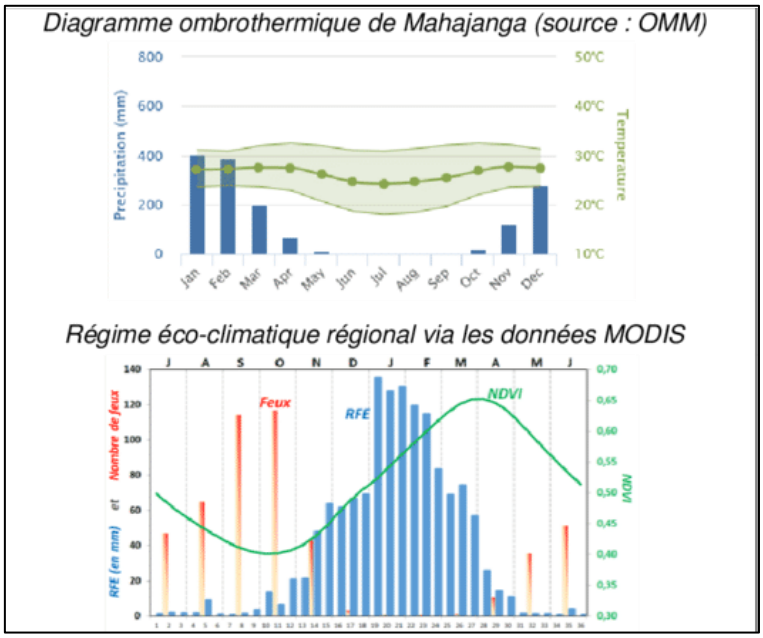


Figure 2: Diagramme ombrothermique et Régime éco-climatique régional

2.3 Pédologie

En matière de pédologie, les sols de la Région sont composés par trois grands types de sols, d'origine ferrugineux tropicaux dont les **sols des tanety latéritiques rouges**, qui dominent en petite partie sur Ambatoboeny, Soalala, Mitsinjo, Marovoay et Mahajanga II ; les **sols hydromorphes** des bas-fonds ou de plaines, qui occupent en général les parties en amont où commencent les mangroves, c'est-à-dire quelques kilomètres des embouchures des grands fleuves : Mahavavy, Betsiboka et Mahajamba et les **baiboho**, qui se trouvent sur les bourrelets de chaque berge des grands fleuves précédents. Ce sont des terres cultivables situées dans les zones de Marovoay, Mahajanga II, Mitsinjo et Ambato Boeny.

Plus précisément, cinq classes de sols ont été identifiés durant une étude faite dans la Région dont les sols ferrugineux qui recouvrent 52% de la région, viennent ensuite les sols minéraux bruts à 22%, les sols hydromorphes à 10% et les sols peu évolués et sols calcaires à environ 7% chacun (LLANDDEV, 2022). Puisque les sols ferrugineux sont moyennement à assez sensibles à l'érosion (Duchaufour, 1991), les sols de la région sont alors vulnérables au changement climatique comme la forte pluie qui peut entrainer des pertes en terre (cf. figure 3).

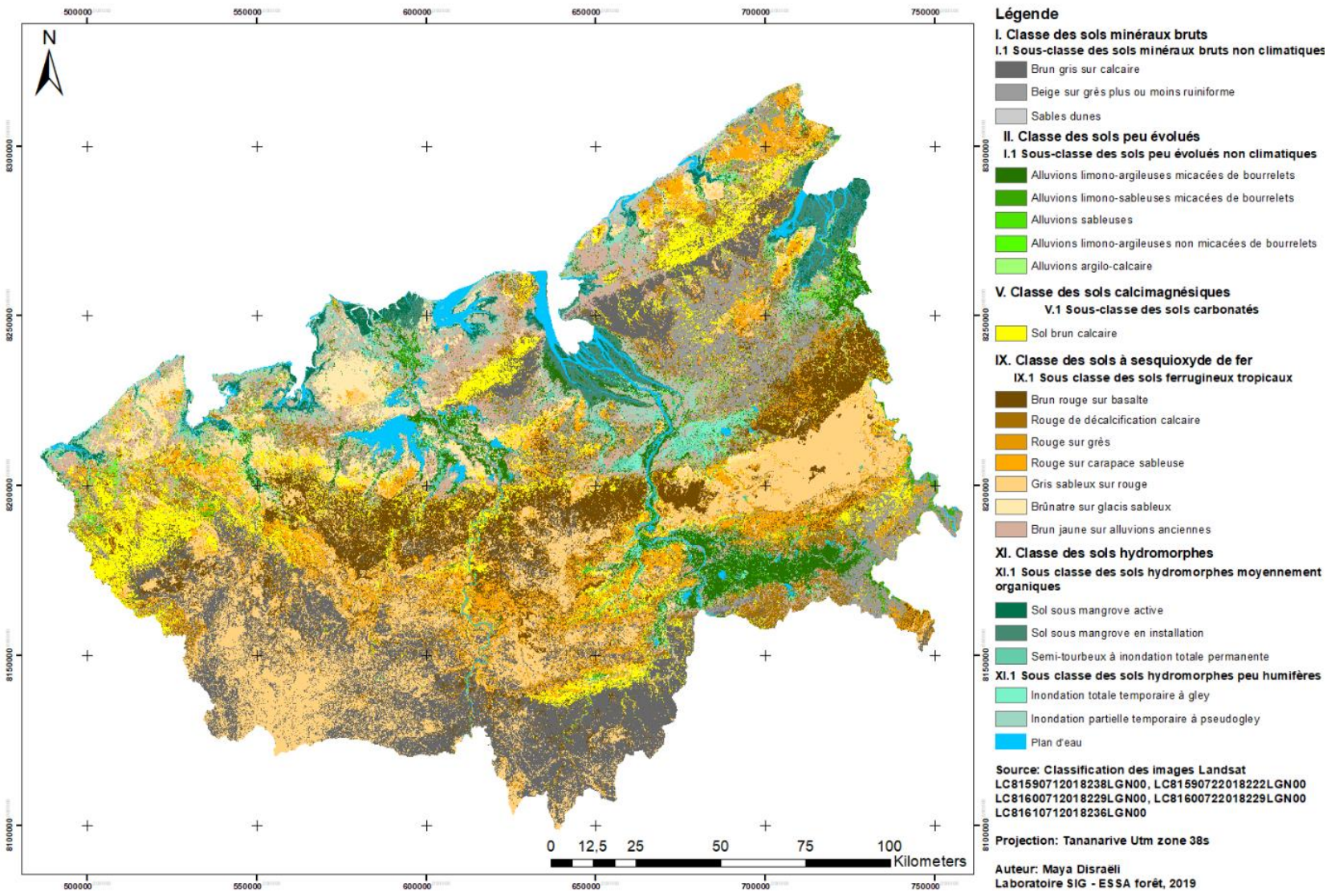


Figure 3: Carte pédologique de la région Boeny issue de 12 variables environnementales

2.4 Occupation de sol

Dans la Région Boeny, en 2018, l'occupation de sol le plus important est surtout la forêt recouvrant 41,92 % de la région due à la présence des aires protégées dont le parc national d'Ankarafantsika, le parc national de la Baie de Baly, le parc national de Namoroka et les forêts du paysage harmonieux protégé du complexe Mahavavy Kinkony. Ensuite, 38,2% de la Région est recouvert de savane herbeuse ; la culture occupe 7,8 % ; le sol nu environ 5,4% ; les bâtiments sont répartis dans 3,3% de la surface de la région ; et le reste est occupé par les points d'eau c'est à dire 3,2% (LLANDDEV, 2022) (cf. figure 4). La couverture forestière a connu des baisses importantes ces dernières (2018/2023) années liées à des incursions de feux dans les Aires protégées de la région.

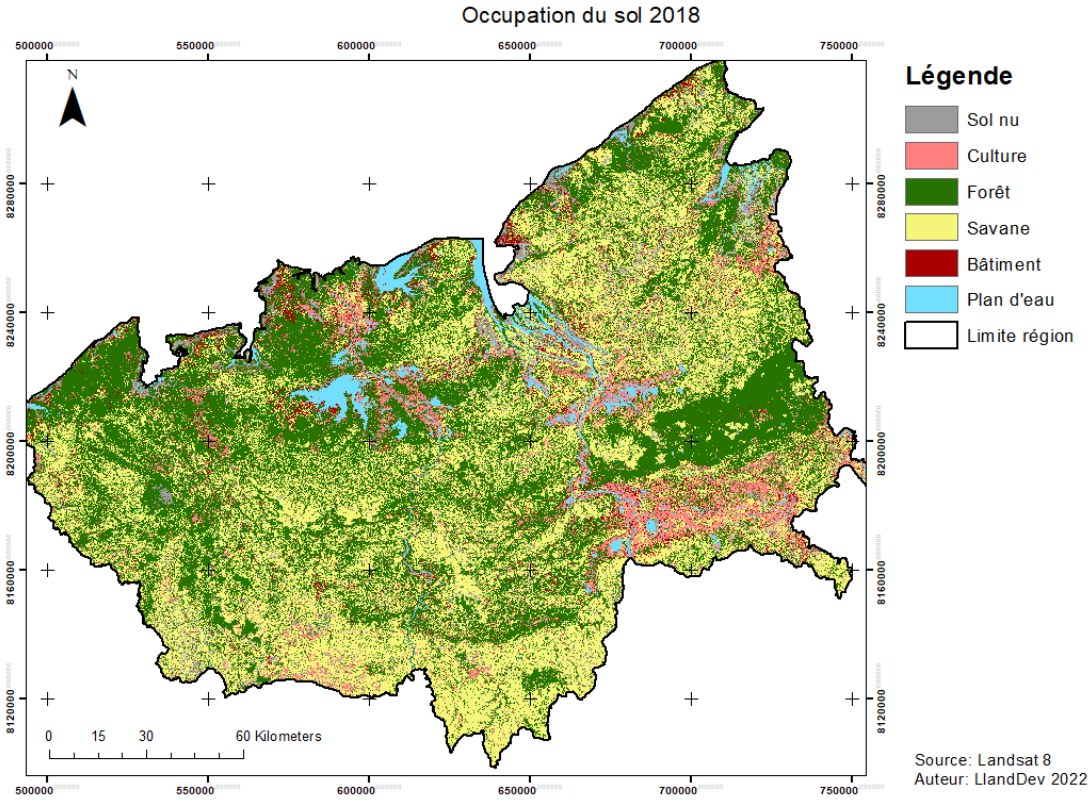


Figure 4: Occupation du sol de la région Boeny en 2018

3 DEMARCHE METHODOLOGIQUE

La démarche méthodologique s'articulera sur quatre principales parties notamment la phase préparatoire pour rassembler des informations au moyen d'une revue bibliographique, l'identification des parties prenantes ; la collecte de données et le traitement et l'analyse de données.

3.1 Phase préparatoire

Cette phase consiste à rassembler des informations au moyen d'une revue bibliographique. Il s'agissait notamment de réunir les premiers éléments sur le contexte, les objectifs et les résultats attendus.

Cette partie préparatoire vise surtout à :

- ✓ Approfondir la connaissance du projet et son cadre logique pour mieux comprendre l'attente ;
- ✓ Elaborer un listing des acteurs – étatiques et non ;
- ✓ Elaborer la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de système de pâturage au changement climatique avec une élaboration de bilan carbone ;
- ✓ Elaborer les outils de collecte d'informations sur le terrain et
- ✓ Préparer les visites sur le terrain.

3.2 Identification des parties prenantes

La connaissance des parties prenantes permet d'identifier la coopération avec les acteurs importants pour les prestations. Les acteurs importants sont surtout composés des autorités locales comme les chefs communaux, les chefs Fokontany, les chefs secteurs, les « Sojabe » ou les personnes clés dans le village ; des comités de gestion des Aire protégées ; des partenaires dont le DRAE et FOFIFA et des éleveurs composés des comités villageoises et le VOI (cf. Tableau 1). La coopération avec ces acteurs a permis de faire des entretiens et des collectes des données sur l'évaluation de la vulnérabilité des exploitations, la dimension adaptation en étudiant les préférences des agriculteurs, les postes sources et puits de carbone, les flux de ressources et les modes de gestion du système de pâturage.

Tableau 1: Identification des parties prenantes

Acteurs importants	Responsabilité
Autorités locales (Communale, Fokontany, Secteurs, Sojabe : personnes clés)	Gestion du système de pâturage lié au changement climatique
Comités de gestion des Aires Protégées (Antrema)	
Partenaires (DRAE, FOFIFA)	
Eleveurs (communautés villageoises, VOI)	Elevage bovin et culture fourragère

3.3 Collecte de données

La collecte de données se fait en deux parties. La première partie est constituée par le prélèvement de sol sous les pâturages, tandis que la deuxième est caractérisée par des entretiens aux niveau des parties prenantes.
Le projet ambitionne de cibler les éleveurs adoptant les pâturages améliorés dans la Région. Il est ainsi impératif d'inclure des échantillons témoins (savane indigène utilisé) pour une étude de comparaison.

Afin d'optimiser le système de collecte de données, les échantillons enquêtés sont constitués par le nombre total de paysans pratiquant le système de pâturage semi-amélioré et à ce même nombre de paysans utilisant le système de pâturage traditionnel dans les communes d'intervention. Cette activité a été réalisée pendant une durée de 16 jours.

3.3.1 Prélèvement de sol

Le prélèvement de l'échantillon composite du sol a été effectué sur chaque parcelle des paysans enquêtés pour savoir les taux de carbone organique du sol, d'azote totale, de phosphore et de potassium. La forme de la placette de prélèvement de l'échantillon est un carré de 1 mètre de côté. Les

échantillons, pour déterminer les données sur ces nutriments sont prélevés sur les 2 sommets (en rouge sur la figure 5) (Soltner, 2011).
Les matériels utilisés lors de la collecte des échantillons entre 0 et 30 cm de profondeur de sol sont constitués par un cylindre creux tranchant sur le bord inférieur de 5 cm de diamètre sur 5 cm de hauteur pour prélever l'échantillon du sol, un marteau pour enfoncer le cylindre, une pelle pour couper et soulever le sol prélevé, des sachets en plastique hermétique pour conserver l'échantillon et un GPS pour pointer le lieu d'échantillonnage (cf. Annexe 3).

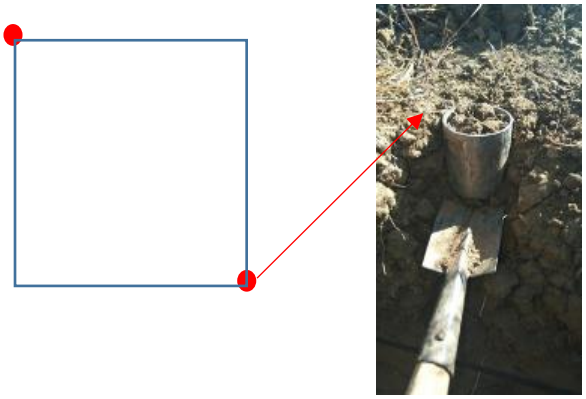


Figure 5: Forme de placette et prélèvement de l'échantillon du sol

3.3.2 Entretiens aux niveaux des parties prenantes

Il s'agit d'une série d'entretiens semi-directifs visant à obtenir un certain nombre de réponses sur les concepts de vulnérabilité et d'adaptation du système de pâturage. Au cours de cette phase, des **entretiens** ont été menés auprès des acteurs présents dans la zone d'étude (cf. tableau 1). Les données quantitatives et qualitatives ont été collectées simultanément.

Plusieurs questions sont posées au cours de cet entretien pour connaitre les caractéristiques de système de pâturage et pour répondre à la méthodologie de concept de risque climatique développé dans l'AR5 du GIEC (GIZ et EURAC, 2017) avec les composantes risque, danger, vulnérabilité et exposition (Cf. Annexe 1 et figure 6). Plusieurs points ont été discutés au cours de cette phase dont principalement :

- ✓ Les caractéristiques du système de pâturage dans la région Boeny,
- ✓ L'identification des impacts et risques climatiques (risque),
- ✓ La détermination de danger et les impacts immédiats (danger),
- ✓ La détermination de la vulnérabilité,
- ✓ La détermination de l'exposition et
- ✓ La conduite de réflexion collective sur les mesures d'adaptation.

Un questionnaire, a été développé en vue de collecter les informations sur les parcelles de culture fourragère et les nombres de zébus (Cf. Annexe 2).

3.3.2.1 Caractéristiques du système de pâturage

Le but de cet inventaire est d'identifier les pratiques de pâturage dans la région Boeny qui peuvent être le système de pâturage amélioré avec des cultures fourragères (*Stylosanthes spp.* et *Brachiaria spp., etc*) ou le système de pâturage traditionnel avec des savanes indigènes (*Hyparrhenia spp.*, *Aristida spp.*, etc) ou les résidus des cultures. Il est à noter que les systèmes de pâturage améliorés sont mis en place sur des anciennes parcelles de pâturage traditionnel d'une manière générale (permettant d'émettre une hypothèse de départ les mêmes caractéristiques de sol des parcelles observées).
Les tendances concernant leur qualité et leur disponibilité sont également évaluées. Au cours de cette phase, des questions se sont portées sur l'accès à ces ressources, leur gestion et l'évolution de la production durant ces dernières années ou leur fluctuation.
Une étude antérieure faite par Burnod et al, en 2021 a montré les caractéristiques du système de pâturage et leur mode de conduite de troupeau dans cette région (cf. tableaux 2 et 3).

Tableau 2: Caractéristiques du système de pâturage dans la région Boeny

Mode de conduite	Nombre de zébu	Lieu de regroupement (savane indigène : Kijana[1], Tany firaofan'aomby[2])
Zébu de trait (soavaly)	2	- 1 à 2 km du village (Savane indigène) - Champ récolté - Bas fond
Zébu gardé par des bouviers (aomby asesy)	30 à 50	- 1 à 2 km du village (Savane indigène) - 5 à 8 km du village (Savane indigène) - Champ récolté
Zébu pas gardé par des bouviers (aomby tondraka)	30 à 40	- 5 à 10 km du village (Savane indigène)

Tableau 3: Mode de conduite de troupeau pendant la saison sèche

Localisation	Conduite de troupeau pendant la saison sèche
Antrema **Analatelo** **Antsiatsiaka** **Ambalakida**	Savane indigène
Tsaramandroso **Betsako**	Savane indigène Paille Résidus des récoltes (niébé) Culture fourragère

Cette étape est d'une importance capitale car elle constitue le premier pas vers la cartographie des ressources de pâturage dans la région Boeny, sur le plan écosystémique d'une part et d'autre part, par rapport aux secteurs dans lesquels s'investissent les populations locales.

[1] Kijana : Pâturage de jour et de nuit. D'après les coutumes locales, grand pâturage pour l'élevage extensif éloigné des villages, où paissent et dorment les zébus.
[2] Tany firaofan'aomby : Pâturage de jour

Il est à noter que les parties 3.3.2.2 à 3.2.2.4 suivantes sont tirées de la méthodologie de concept de risque climatique développée par GIEC et EURAC en 2017.

3.3.2.2 Identification des impacts et risques climatiques (Risque)

L'identification des impacts et risques climatiques s'agit d'identifier les phénomènes météorologiques et les évènements climatiques extrêmes qui ont impacté le système de pâturage par le passé, la constatation de nouvelles évolutions ou de nouveaux évènements (par exemple au cours de ces dix dernières années) et les impacts socio-économiques constatés comme conséquences de ces évènements climatiques (par exemple perte de rendements, augmentation des maladies).

L'identification des principaux impacts et risques climatiques commence par une vue d'ensemble, y compris un examen et un processus de réflexion (brainstorming) sur les impacts et les risques climatiques. Ensuite, il est possible de regrouper et limiter le choix à un ou plusieurs risques en fonction de l'objet de l'évaluation. Enfin, il est important d'éliminer tous les impacts et risques qui sont influencés de manière significative par des facteurs non liés au changement climatique, en ne retenant comme point de départ que les impacts et risques clairement liés au climat.

Par conséquent, le libellé final du risque peut être composé de l'impact (risque de quoi), du danger (impact de quoi) et des éléments exposés (ce qui ou qui est en danger) (cf. figure 6, encadré grenat).

3.3.2.3 Détermination de danger et les impacts immédiats (Danger)

La composante « danger » se compose de deux parties : le signal climatique et l'impact physique direct. Pour identifier le ou les signaux climatiques pertinents, il faut commencer par le risque choisi, puis travailler du bas vers le haut en identifiant les impacts intermédiaires associés qui mènent au risque jusqu' aux dangers (impacts physiques directs ou signaux climatiques).

Effectivement, les facteurs liés au climat suivent habituellement une séquence qui va de facteurs facilement mesurables, comme la température et les précipitations, à des facteurs plus complexes comme la disponibilité de l'eau.

Pour faire la distinction entre le danger et l'impact intermédiaire, deux principes généraux sont essentiels tels que : premièrement, les facteurs peuvent être attribués à l'une des trois composantes du risque seulement (risque, vulnérabilité, exposition) (cf. figure 6 encadré bleu). Deuxièmement, les facteurs influencés à la fois par des facteurs de risque et de vulnérabilité doivent être considérés comme des impacts intermédiaires (cf. figure 6, encadré gris).

Contrairement aux trois composantes (danger, vulnérabilité, et exposition), les impacts intermédiaires ne sont pas une composante de risque en soi, mais simplement un outil supplémentaire pour saisir pleinement la chaine de causalité qui conduit au risque. Par définition, ils sont fonction à la fois des facteurs de danger et de vulnérabilité, ce qui signifie que tous les impacts identifiés qui dépendent non seulement du signal climatique mais aussi d'un ou plusieurs facteurs de vulnérabilité doivent être considérés comme des impacts intermédiaires.

3.3.2.4 Détermination de la vulnérabilité

La détermination de la vulnérabilité permet de connaitre les caractéristiques du système qui contribuent au risque. Elle est constituée par des facteurs de sensibilité et de capacité (cf. figure 6, encadré vert).

La sensibilité comprend l'environnement physique ainsi que les aspects socio-économiques ou culturels tels que l'état du sol, les systèmes d'irrigation ou les modes d'utilisation des terres. Lors de l'identification des ressources affectées, la connaissance des sources majeures d'émission de GES dans les systèmes de pâturage (comme les feux de brousses pour les savanes indigènes et l'efficacité des rendements pour les cultures de fourrages améliorés) sont nécessaires.

Les facteurs de capacité comprennent les aspects qui caractérisent la capacité (ou l'incapacité) à faire face[3] à une situation défavorable ainsi que les aspects qui déterminent la capacité (ou l'incapacité) à s'adapter[4] aux situations futures.

Afin d'identifier les capacités existantes ou manquantes, il faut prendre en compte les aspects directement liés aux risques ainsi que des aspects plus généraux. Il est sans doute utile de garder en tête les quatre dimensions de la capacité d'adaptation dont les connaissances ou une expertise qui pourraient faciliter l'adaptation ; l'existence ou la manque des solutions techniques qui permettraient d'accroître la capacité ; la façon dont l'environnement institutionnel contribue à la capacité et les ressources économiques et financières qui sont disponibles ou manquantes pour renforcer les capacités ou mettre en œuvre des mesures d'adaptation.

3.3.2.5 Détermination de l'exposition

La détermination de l'exposition fait référence à la présence de quelque chose de valeur dans le système de préoccupation. Cette composante exprime la pertinence des éléments exposés dans le système de pâturage. Par exemple « le nombre des éleveurs de bovins traditionnels » pourraient être des facteurs appropriés. Par conséquent, plus la part des éleveurs de bovins traditionnels dans la population totale de cette région est élevée, plus le risque est élevé (cf. figure 6, encadré jaune).

[3] Capacité à faire face : « Aptitude des personnes, des institutions, des organisations et des systèmes à réagir efficacement à des situations difficiles et à les surmonter, à court et à moyen terme, en s'appuyant pour cela sur leurs compétences, leurs valeurs, leurs croyances, leurs ressources et d'éventuelles opportunités » (par ex. en mettant en place des systèmes d'alerte précoce). (GTII AR5, glossaire p. 182)

[4] Capacité d'adaptation : Faculté d'ajustement des systèmes, des institutions, des êtres humains et d'autres organismes, leur permettant de se prémunir contre d'éventuels dommages, de tirer parti des opportunités ou de réagir aux conséquences (par ex. connaissances permettant d'introduire de nouvelles méthodes agricoles).

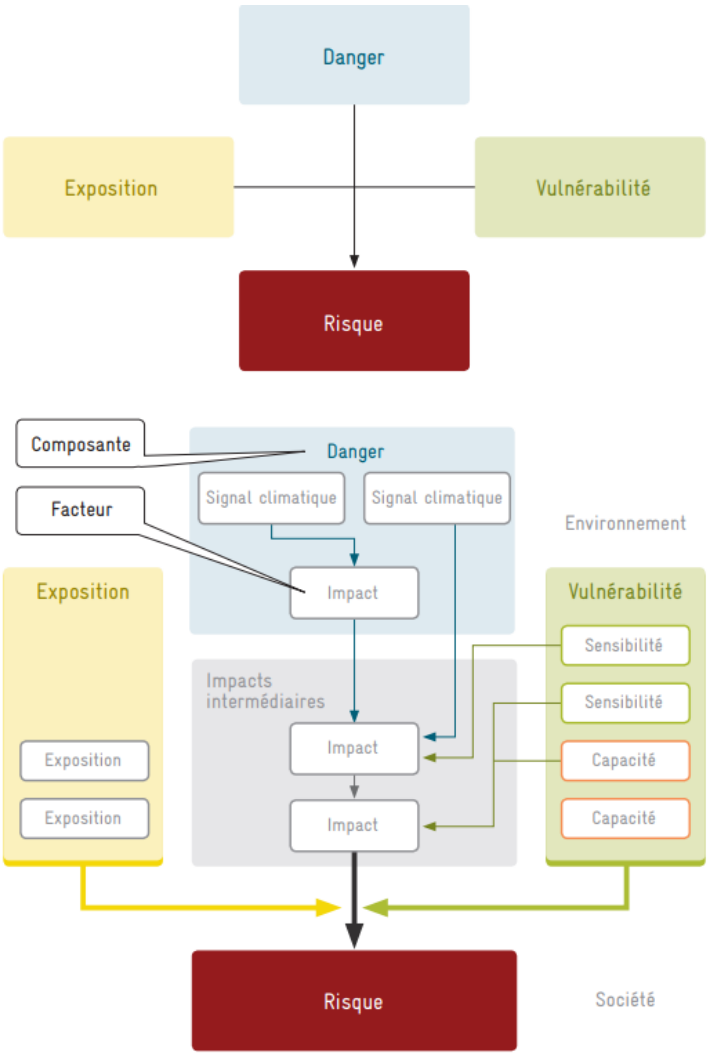


Figure 6: Structure d'une chaine d'impact selon l'approche de l'AR5 du GIEC. Vue d'ensemble générale du concept (partie supérieure de la figure) et de la structure détaillée (partie inférieure)

3.3.2.6 Conduite de réflexion collective sur les mesures d'adaptation

Lors de l'identification des stratégies d'adaptation, la connaissance des actions, des appuis externes (projet/programme) pour anticiper sur les effets de ces risques et les initiatives à prendre pour réduire la vulnérabilité est utile. Ces informations ont été obtenues à travers les entretiens réalisés auprès des partenaires identifiés dans le tableau 1.

3.3.3 Outils de collecte de données

La collecte de données est basée sur deux types d'outils dont :

- Le guide d'entretien « Acteurs ressources » (cf. annexe 2) et
- Les cartes de la zone d'enquête qui ont permis de localiser les parcelles de culture fourragère et les pâturages indigènes ainsi que les habitations des ménages enquêtés (cf. figure 7).

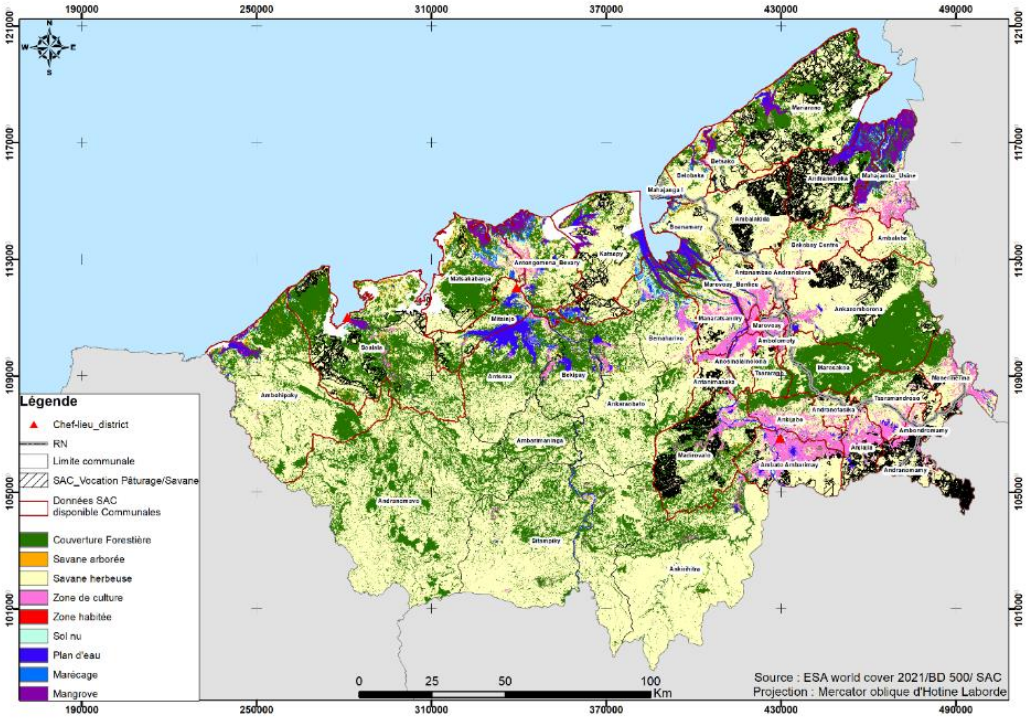


Figure 7: carte de répartition du système de pâturage dans la Région Boeny

3.4 Traitement et analyse de données

Le traitement de l'ensemble des données, recueillies grâce aux recherches bibliographiques, aux questionnaires et aux échantillons du sol, est effectué par deux experts international et national afin de conduire à l'analyse de carbone du sol par la méthode de perte au feu ou LOI (Loss On Ignition) ; à l'évaluation de la vulnérabilité du système de pâturage au changement climatique et à l'évaluation de la contribution du système de pâturage au changement climatique par le bilan carbone.

3.4.1 Evaluation de la relation entre le carbone organique du sol par la méthode de perte au feu (Loss of Ignition) et les pratiques de pâturage

Le principe de la méthode de perte au feu ou « Loss On Ignition (LOI) » consiste à chauffer les échantillons du sol dans un four à moufle de 400°C pendant 6 h sous air ou sous atmosphère neutre. Elle est utilisée pour déterminer la matière organique par incinération (perte au feu ou perte par calcination). La quantité de masse perdue correspond à la masse de matière organique du sol qui permettra par la suite de calculer la teneur en carbone (Nelson and Sommers, 1996).

Le test t de Student a été employé pour voir si le taux de carbone organique du sol varie selon les pratiques de pâturage. La comparaison entre la moyenne de carbone organique du sol des parcelles à savane indigène et fourrage amélioré a été également calculée afin d'en sortir un facteur moyen de l'effet de type de pâturage sur le carbone organique du sol pour avoir des données précises afin de calculer le bilan carbone plus tard.

Les données récoltées à partir des échantillons sont la densité apparente du sol (cf. équation 1) et le taux de COS (cf. équation 2) par la méthode de perte en feu ou LOI (Loss on Ignition) en laboratoire.

Les résultats de l'échantillon sont calculés à partir des équations suivantes :

$$Da\ \left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{Masse\ sèche\ de\ l'échantillon\ \text{à}\ 60°C\ (g)}{Volume\ de\ l'échantillon\ \text{à}\ l'état\ humide\ (cm^3)}$$

Équation 1: Formule de la Densité apparente (Da)

Avec : **Volume v = π × r^2× h**
r : rayon du cylindre en cm
h : hauteur du cylindre en cm

$$COS\ LOI\ \left(\frac{Mg}{ha}\right) = \%\ C\ \times Longueur\ d'intervalle(cm)\ \times Da\ (g.cm^{-3})$$

Équation 2: Formule du carbone organique du sol (COS)

Avec : *%C*= **Masse perdue (g)/1,724**
Dont : **Masse perdue** = Masse du sol à 105°C (g) – Masse du sol à 400°C(g)
Le coefficient **1,724** est pris si le carbone représente 58 % de la matière organique
Source : Kauffman J. B. and Donato D. C., 2012.

3.4.2 Evaluation de la vulnérabilité du système de pâturage au changement climatique

L'évaluation de la vulnérabilité des différents systèmes de pâturage au changement climatique permet de déterminer le(s) risque(s) lié(s) au changement climatique qui pèsent sur les différents systèmes de pâturage proposés, les sources majeures de l'émission de GES dans le système et les variétés qui réduisent ou augmentent les capacités de réponse et d'adaptation.
Elle se basera sur l'inventaire et la(les) caractéristique(s) de système de pâturage dans la région Boeny, l'identification des risques climatiques, l'identification des ressources affectées et ses causes et les stratégies d'adaptation déjà mises en place actuellement.

3.4.3 Evaluation de la contribution du système de pâturage au changement climatique par le bilan carbone

Pour comparer les séquestrations de carbone par rapport aux pratiques des pâturages (améliorés ou savane indigène), une estimation du taux d'équivalent CO_2 présent dans chaque occupation du sol est effectuée.
Ces données sur le stock de carbone permettent ainsi de connaitre la variété la plus adaptée dans une stratégie d'atténuation des émissions de GES pour que ce système fourrager pourrait compenser les émissions de l'élevage des bovins (bilan carbone positif).
Ce projet relatif au système de pâturage peut augmenter le piégeage du carbone et améliorer la diversité biologique. La gestion de pâturage peut permettre de piéger le carbone dans les sols et inclut les fourrages améliorés et la gestion des feux.

3.4.3.1 Estimation des variations des stocks de carbone des pâturages

L'estimation des variations des stocks de carbone des pâturages est faite dans deux bassins de carbone dont la biomasse vivante et les sols.
Puisque les pratiques de gestion de pâturage indigène dans la région Boeny sont statiques, les stocks de carbone de la biomasse seront à peu près stables (c'est-à-dire que l'accumulation de carbone due à la croissance végétale est pratiquement annulée par les pertes dues à la décomposition et aux feux). En

conséquence, ce niveau suppose par défaut que les stocks de carbone de la biomasse vivante sont stables dans les pâturages indigènes mais varient en fonction de culture fourragère pour les pâturages améliorés.

D'où la **variation de stocks de carbone des pâturages indigènes** se repose sur le carbone du sol (cf. équation 3). Pourtant, la valeur de référence par défaut (sous végétation naturelle) pour les stocks de carbone organique des sols (COS_{ref}) (tonnes C par ha a une profondeur entre 0 et 30 cm) est de **31 t C/ha** dans la région tropicale sèche à sol sablonneux comme Boeny (GIEC, 2003).

La variation annuelle des stocks de carbone des sols pour un système de prairies est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta C_{PP_{Minéraux}} = \frac{[(COS_0 - COS_{(0-T)}) \times S]}{T}$$

$$COS = COS_{REF} \times F_{UT} \times F_{RG} \times F_A$$

Équation 3: Variation des stocks de carbone des sols

Avec :

$\Delta CPP_{Minéraux}$ = variation annuelle des stocks de carbone des sols minéraux, en t C an^{-1}

COS_0 = stocks de carbone organique des sols pour l'année d'inventaire, en t C ha^{-1}

$COS_{(0-T)}$ = stocks de carbone organique des sols T années avant l'inventaire, en t C ha^{-1}

T = période d'inventaire, en années

S = superficie de chaque parcelle, en ha

COS_{REF}= stocks de carbone de référence, en t C ha^{-1}

F_{UT} = facteur de variation des stocks pour le type d'utilisation des terres ou changement d'affectation des terres, adimensionnel (cf. tableau 4)

F_{RG} = facteur de variation des stocks pour le régime de gestion, adimensionnel (cf. tableau 4)

F_A = facteur de variation des stocks pour l'apport de matière organique, adimensionnel (cf. tableau 4)

Tableau 4: Facteurs de variation de stocks de carbone relatifs pour la gestion des pâturages à régime climatique tropical

Facteur	Niveau	Valeur par défaut GIEC	Valeur par défaut revue	Erreur
Utilisation des terres (F_{UT})	Tous	1	1	S/O[5]
Gestion (F_{RG})	Gérées nominalement (non - dégradée)	1	1	S/O
	Prairies Moyennement dégradées	S/O	0,97	± 10%
	Fortement dégradées	0,7	0,7	± 50%
	Prairies améliorées	1,1	1,17	± 10%
Apports (appliqués seulement sur des prairies améliorées) (F_A)	Nominal	S/O	1.0	S/O
	Élevé	S/O	1,11	± 8%

Source : GIEC, 2003

[5] S/O signifie « Sans Objet », lorsque les valeurs des facteurs sont des valeurs de référence définies ou lorsque les valeurs des facteurs n'ont pas été déjà estimées pour les Lignes directrices du GIEC

Pourtant, la **variation de stocks de carbone des pâturages améliorés** se repose sur le stock de carbone du sol (cf. équation 4) et de la biomasse (cf. équations 5 et 6). L'estimation par défaut pour la biomasse sur pied des pâturages dans les régions tropicales sèches comme Boeny est de **2,3 t.m.s.ha^{-1}** (GIEC, 2003).

$$\Delta C_{PP_{BV(c,i,g)}} = \left(\Delta B_{vivace} + \Delta B_{herbacées\ graminées}\right) \times FC$$

Où :
$\Delta CPP_{BV(c,i,g)}$ = variation des stocks de carbone de la biomasse vivante pour un type spécifique de prairies i, zone climatique c, et régime de gestion g, en t C an^{-1}
ΔB_{vivace} = variation de la biomasse ligneuse vivace aérienne et souterraine, en t m.s. an^{-1}
$\Delta B_{herbacées\ graminées}$ = variation de la biomasse souterraine d'herbacées graminées, en t m.s. an^{-1}
FC = fraction de C de la matière sèche (valeur par défaut = 0,5), en t C (t m.s.)$^{-1}$

On peut estimer les variations pour la biomasse vivante (ΔB) avec les stocks de biomasse pour deux points temporels (cf. équation 5) :

$$\Delta B = \frac{\left(B_{t_2} - B_{t_1}\right)}{\left(t_2 - t_1\right)}$$

Équation 4: Variation annuelle pour la biomasse vivante

Où :
ΔB = variation annuelle pour la biomasse vivante, en t m.s. an^{-1}
B_{t2} = biomasse au point temporel t2, en t m.s.
B_{t1} = biomasse au point temporel t1 , en t m.s.
Source : GIEC, 2003

3.4.3.2 Estimation des émissions de GES du système de pâturage

Les émissions de CH_4 associées aux pâturages sont souvent les émissions de méthanes imputables au bétail des pâturages (fermentation entérique) et devront être calculées et notifiées suivant l'équation 6.
L'ingestion volontaire journalière de matière sèche pour les zébus est de **20,83±1,58 g/kg de poids vif**. Une analyse révèle qu'aucune différence significative n'est observée entre les quantités de méthane entérique engendrées par les différents niveaux d'herbes offertes. Les émissions de méthane varient entre **97,74±19,77 g/animal/j** (GBENOU G. X. et al, 2022).

$$Emissions = FE_{(T)} \times \left(\frac{N_{(T)}}{10^6}\right)$$

Équation 5: Emission de méthane due à la fermentation entérique

Dont :
Émissions = Émissions annuelles de méthane dues à la fermentation entérique, Gg CH_4 /an
FE(T) = Facteur d'émissions de la catégorie de bétail définie, kg CH_4/tête/an
N(T) = Nombre de têtes de l'espèce de bétail/catégorie T dans le pays
(T)= Espèce/catégorie de bétail
Source : GIEC, 2006

3.4.3.3 Estimation du bilan carbone équivalent du système de pâturage

L'estimation final du bilan carbone sort donc du modèle de bilan d'équivalent CO_2 par rapport aux facteurs suivants :

- La superficie de chaque parcelle paysanne,
- Le stock de carbone de sol de référence,
- Le type d'utilisation des terres ou changement d'affectation des terres,
- Le régime de gestion du pâturage,
- L'apport de matières organiques dans le sol,
- La pratique de pâturage (indigène ou améliorée) et
- La fermentation entérique.

Pour estimer le bilan carbone équivalent du système de pâturage, les unités d'émissions/d'absorptions de CO_2 et émissions de méthane sont exprimées en gigagrammes de carbone équivalent (Gg $CO_{2éq}$).

Pour convertir le CH_4 en $CO_{2éq,}$ il faut multiplier la valeur par 25.

Pour convertir les tonnes de carbone (t C) en Gg $CO_{2éq}$, multiplier la valeur par 44/12 et 10^{-3}. (GIEC, 2003)

3.4.4 Evaluation de la teneur en éléments principaux dans le sol (Azote total, Phosphore, Potassium) par système de pâturage

Le test de Mann – Whitney (α=0,05) a été utilisé pour tester si la teneur en azote totale, en phosphore ou en potassium (variable quantitative) varie en fonction des différents types de pâturages dont le pâturage traditionnel et le pâturage amélioré (variable qualitative). La différence entre les moyennes des teneurs en éléments principaux dans le sol observés pour les modalités est significative si la p-value observée est inférieure au seuil de significativité α.

En somme, les étapes suivantes ont été nécessaires durant la démarche méthodologique (cf. figure 8) :

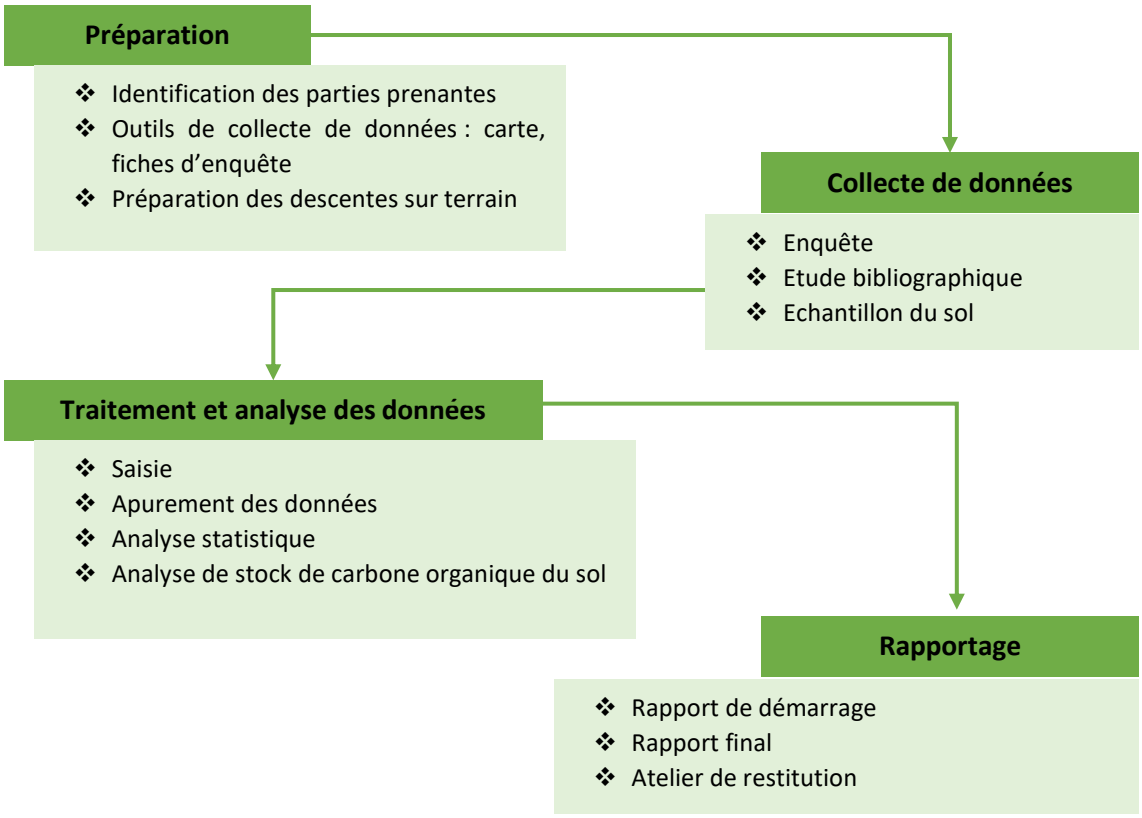


Figure 8: Synthèse de l'approche méthodologique

4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 Relation entre le carbone organique du sol par la méthode de perte au feu et les pratiques de pâturage

Les résultats de l'analyse indiquent que les sols sous les savanes indigènes présentent une masse de carbone significativement inférieure (36,24 t C/ha) par rapport aux sols sous les fourrages améliorés (55,17 t C/ha), selon le test t de Student (p-value = 0,001). Les pâturages traditionnels sont composés principalement de deux espèces végétales, à savoir *Hyparrhenia sp* et *Aristida sp*. En revanche, les pâturages améliorés sont constitués par les espèces *Brachiaria sp.* et *Stylosanthes* sp. Ces résultats suggèrent que l'introduction de ces différentes espèces végétales dans les pâturages a conduit à une augmentation significative de la masse de carbone dans les sols par rapport aux savanes indigènes (cf. figure 9).

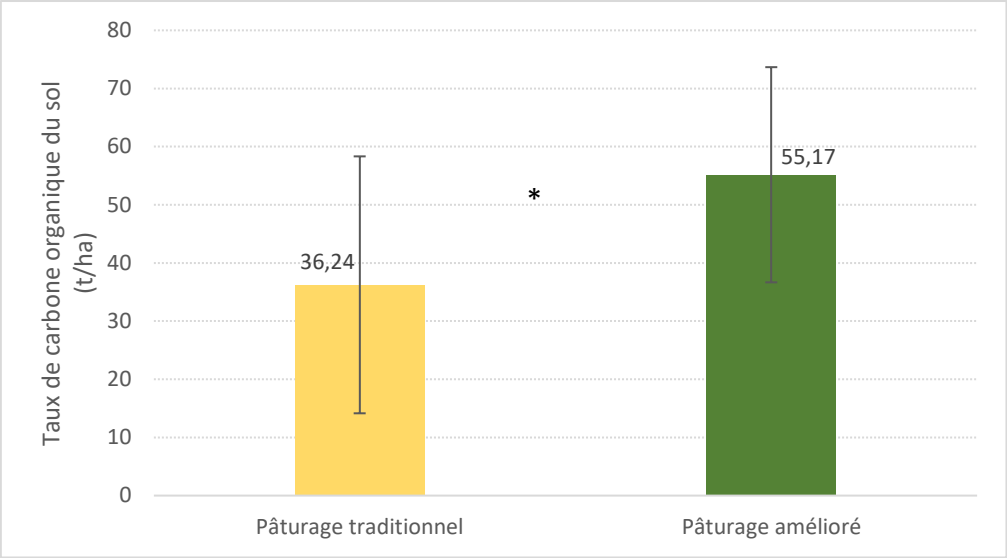


Figure 9 : Comparaison de taux de carbone organique du sol sous savanes indigènes et sous fourrages améliorés

4.2 Vulnérabilité du système de pâturage au changement climatique

4.2.1 Caractéristiques de système de pâturage dans la région Boeny

Les pâturages traditionnels sont sur des terrains communautaires et les limites de l'espace de pâturage ne sont pas précises mais se basent sur des éléments naturels ou artificiels tels que les rivières, les collines, les lacs, les chemins ou les ruelles. Il s'agit de limites coutumières qui ne tiennent pas compte, voire se superposent avec les limites légales figurant sur le Plan Local d'Occupation Foncière (PLOF). Deux types de pâturages indigènes sont constatés : « le kijana » et le « tany firaofan'aomby ». Le « *kijana* » désigne un lieu où les troupeaux restent nuit et jour pour pâturer et dormir et le « tany firaofan'ny aomby » désigne un lieu de pâturage de jour et le soir les animaux sont ramenés dans des enclos villageois.

4.2.1.1 Profils des propriétaires des zébus

Dans les quatre communes d'intervention (Antanambao andranolava, Belobaka, Katsepy et Tsaramandroso), 50 éleveurs ont été enquêtés. 17 parmi eux font des cultures fourragères tout en adoptant le système traditionnel avec le mode de conduite des zébus gardés par les bouviers. Seulement 4% des propriétaires d'animaux sont des femmes qui ne sont pas mariées et ayant le contrôle direct de ses zébus.

Selon les acteurs, dans les villages, entre 1/3 et 1/2 des ménages ont des zébus et la plupart des éleveurs ont deux zébus de trait ou des troupeaux de dix à cinquante têtes. Les quelques grands éleveurs en disposent au maximum actuellement 200, mais ce grand nombre de cheptel n'est plus retenu, du fait de perception de risques de vols, de possibilités d'investissement dans d'autres activités et/ou de difficultés économiques des familles. En général, les zébus sont des signes de richesse, et plus les ménages sont riches, plus ils en possèdent.

4.2.1.2 Type d'alimentation des zébus

Il existe trois types d'alimentation des zébus dont :

- ✓ **Les savanes indigènes**, composées principalement par les espèces *Hyparrhenia sp.*, *Aristida sp.* et *Heteropogon contortus* lesquelles sont quasi inexistantes durant la saison sèche.
- ✓ **Les résidus des cultures**, caractérisés par les pailles de riz et de maïs et les restes des gousses des légumineuses comme les niébés. Ces résidus font partis de complément alimentaire des zébus surtout en saison sèche.
- ✓ **Les espèces issues des cultures fourragères**, constituées par le mélange de *Stylosanthes spp.* et *Brachiaria spp.*. Elles représentent seulement 3,7% de la superficie totale de pâturage consommée par les zébus des éleveurs enquêtés. Les espèces fourragères sont permanentes et supportent les saisons sèches. Elles sont les plus appréciées par les bétails.

4.2.1.3 Mode de conduite des troupeaux (adapté de Burnod et al, 2021)

La présente étude ne fait que fortifier les études antérieures faites par Burnod et al, 2021 en termes de mode de conduite de troupeau dans la région Boeny. Trois modes de conduite des troupeaux coexistent également au niveau des communes d'intervention.

Le premier correspond à des zébus de trait qui est dénommé « ***aomby soavaly*** » ou « aomby *sarety* ». Ils sont en général au nombre de 2 et sont conduits au piquet. Ils sont attachés en des endroits proches des villages et au maximum de 2 kilomètres. En saison sèche (*maintany*), ils pâturent sur les champs récoltés et consomment les restes de culture ou les recrûs herbeux dans les bas-fonds humides. En saison humide (*asara*), ils sont attachés à des arbres sur les espaces non cultivés pour éviter qu'ils n'empiètent sur les cultures. Ils peuvent éventuellement utiliser occasionnellement les *tany firaofan'aomb*y de proximité (cf. figure 10). Et pour les éleveurs appliquant les systèmes de pâturage semi-amélioré, ils apportent des espèces fourragères fauchées pour les zébus de trait.

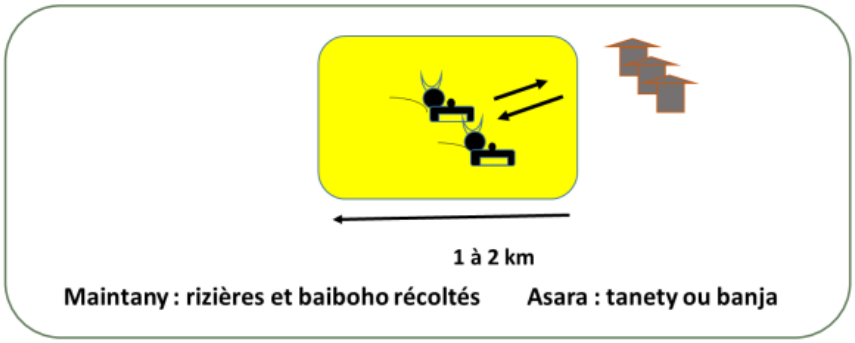


Figure 10: Des zébus de trait cantonnés aux espaces de proximité (cultivés ou en herbe) (Source : Burnod et al, 2021)

Le second mode de conduite est celui des zébus gardés par des bouviers ou « ***aomby asesy*** ». Ces derniers sont conduits et gardés par des bouviers (troupeaux de 3 à 50 têtes) sur les *tany firaofan'aomby* le jour et ramenés chaque soir aux villages. Les zones de pâturages changent d'une saison à l'autre : à 1 à 2 km des villages sur les terrains agricoles récoltés en saison sèche (maintany) et sur les pâturages un peu plus éloignés de 5 à 8 km du village en saison humide (asara) (cf. figure 11). Et pour les éleveurs appliquant les systèmes de pâturage semi-amélioré, ils apportent des espèces fourragères fauchées surtout pour les vaches allaitantes.

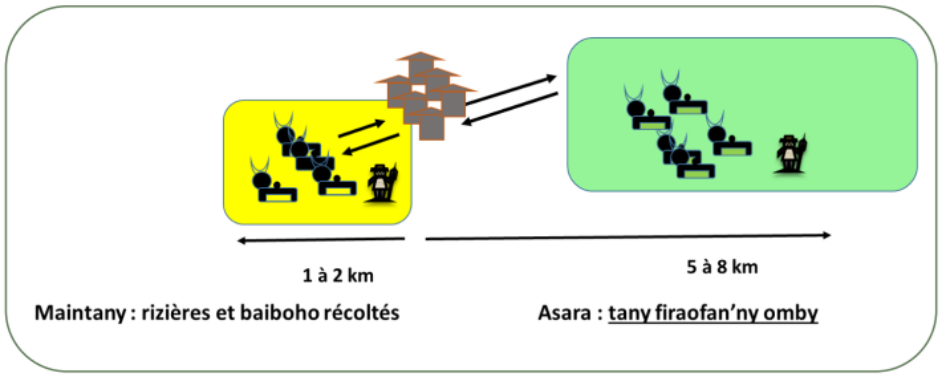


Figure 11: Aomby asesy entre terrains de cultures villageois et pâturages éloignés (Source : Burnod et al, 2021)

Le troisième mode de conduite correspond aux zébus pas gardés par des bouviers ou « ***aomby tondraka*** ». Ces derniers sont laissés sans bouviers dans les *kijana* jours et nuits, kijana éloignés des villages et de grande superficie (généralement de plusieurs milliers d'hectares). Les troupeaux regroupent 30 à 200 têtes. Les propriétaires vont les voir deux à quatre fois par mois, pour les compter et contrôler leur état de santé. Les « *aomby tondraka* » sont réunis dans des lieux de regroupement, dits « *tany fananganan'aomby* » se trouvant à une distance de 5 à 10 km du village. Ces espaces font l'objet de différents rituels pour invoquer et obtenir la bénédiction des esprits de la terre et des ancêtres et permettent de valider socialement l'appropriation coutumière du lieu par le propriétaire du troupeau. Chaque troupeau se réunit dans son propre « *tany fananganan'aomby* » (cf. figure 12*).*

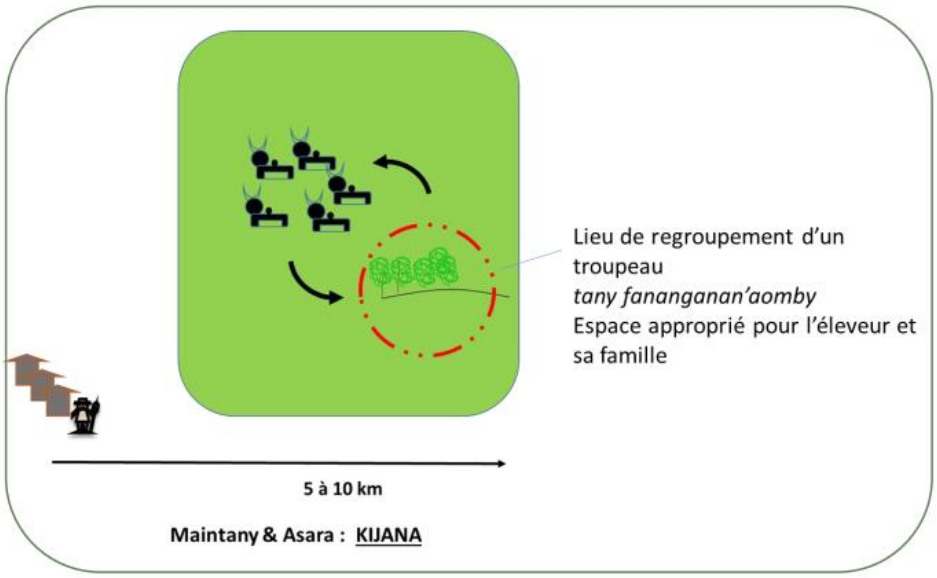


Figure 12: « Aomby tondraka » laissés dans les pâturages éloignés jours et nuits sans surveillance (Source : Burnod P al, 2021)

Durant les entretiens, les éleveurs enquêtés possèdent 145 zébus à Antanambao Andranolava, 745 zébus à Katsepy, 16 zébus à Belobaka (Rasseta) et 451 zébus à Tsaramandroso. Le mode de conduite et le nombre de zébus dans chaque commune d'intervention sont assemblés dans le tableau 5 :

Tableau 5: Mode de conduite de troupeau et le nombre de zébu dans chaque commune d'intervention

Mode de conduite	Commune d'intervention	Nombre de zébu	Lieu de regroupement
Zébus de trait (aomby soavaly)	Katsepy	8	- 1 à 2 km du village (Savane indigène) - Champ récolté - Bas fond - Cultures fourragères
	Tsaramandroso	10	
Zébus gardés par des bouviers (aomby asesy)	Antanambao andranolava	145	- 1 à 2 km du village (Savane indigène) : saison sèche - 5 à 8 km du village (Savane indigène) : saison humide - Champ récolté - Cultures fourragères
	Belobaka	16	
	Katsepy	276	
	Tsaramandroso	361	
Zébus pas gardés par des bouviers (aomby tondraka)	Katsepy (Antrema)	461	- 5 à 10 km du village (Savane indigène)
	Tsaramandroso	80	

4.2.2 Risques liés au changement climatique (chaines d'impacts) sur le système de pâturage

Les chaines d'impacts peuvent aider à mieux comprendre la relation de cause à effet qui détermine les risques liés au changement climatique et le système de pâturage. Ces chaines suivent cinq étapes (cf. Annexe 1) tout en aboutissant à la connaissance de risque principal, des dangers, de la vulnérabilité, de l'exposition et des mesures d'adaptation (cf. figure 13).

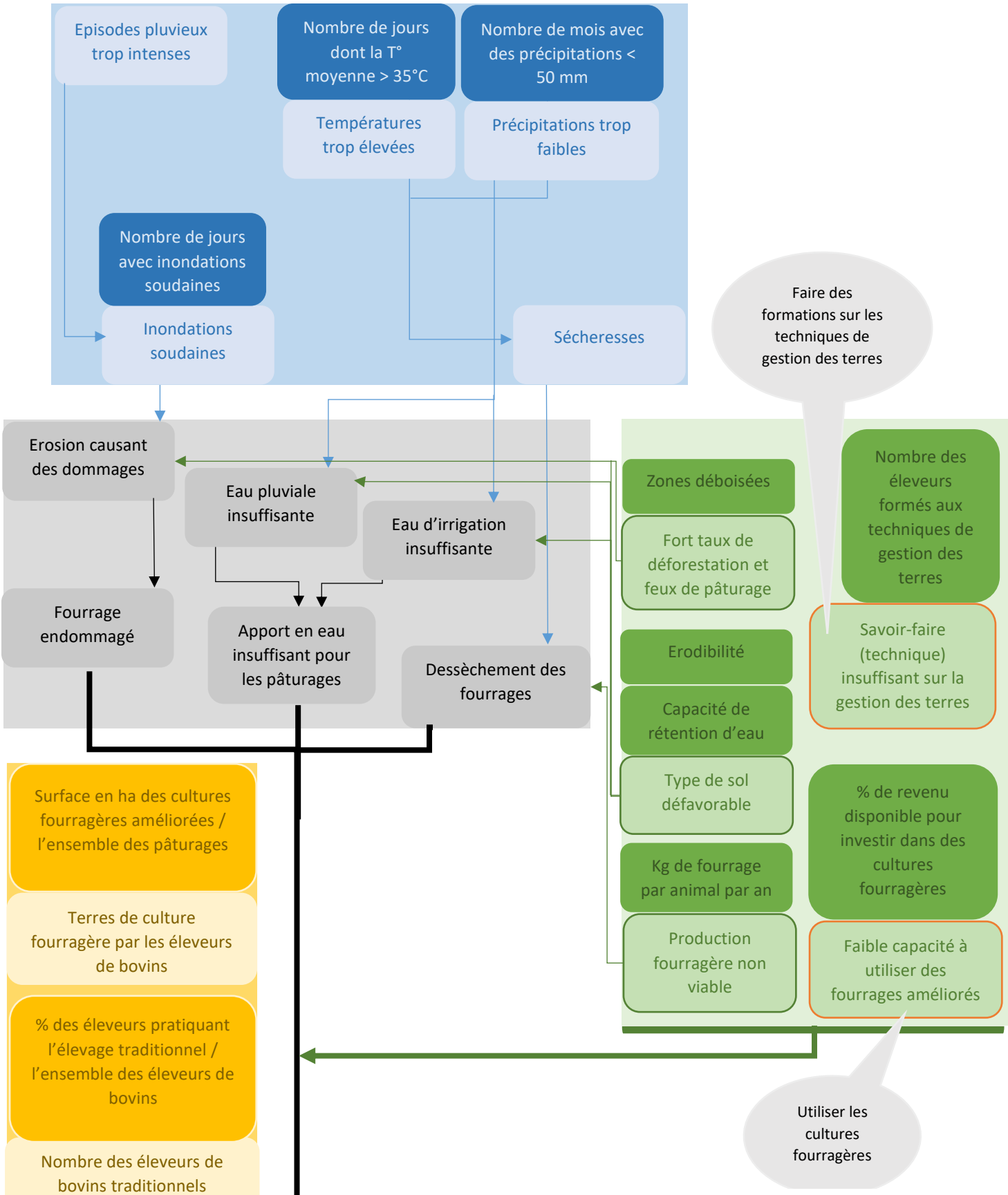


Figure 13: Indicateur de vulnérabilité et d'exposition pour le risque de pénurie de fourrage pour les éleveurs de bovins

Code de classification : cf figure 6 p. 11

4.2.2.1 Risques climatiques (Risque) du système de pâturage

Les risques liés au changement climatique sur le système pâturage pèsent sur les pâturages naturelles, l'élevage bovin et la production des cultures fourragères. Les éléments exposés sont les éleveurs, les zébus, les savanes indigènes et les espèces fourragères.

Les risques et impacts climatiques sur l'accès aux ressources naturelles sont caractérisés par la diminution de la précipitation, l'augmentation des températures et les épisodes pluvieux trop intenses entrainant la perte de qualité et le dessèchement des savanes indigènes. La perte de savane indigène appréciée par les zébus est constatée par les éleveurs au cours de ces dix dernières années avec une prolifération des herbes traditionnelles indésirables avec des épines comme *Heteropogon contortus* ou « danga » surtout pendant la saison sèche.

Concernant l'élevage bovin, l'impact de changement climatique entraine le manque d'alimentation des zébus et l'insalubrité des eaux pour les bétails qui pourraient entrainer de la fatigue ou des maladies des bétails comme la tuberculose laquelle est très répandue dans les communes d'interventions.

Pour les cultures fourragères, l'impact du changement climatique se repose surtout sur le risque de changement de qualité de fourrages entrainant la diminution de production des fourrages améliorées.

De plus, les causes socio-économiques liées à ces évènements climatiques se basent surtout sur la limitation d'accès aux forêts (protection), la dégradation des forêts accessibles (généralement sous cahiers de charge spécifiques), l'exploitation des savanes et les feux de pâturage. Le feu est un moyen efficace d'extension des pâturages dans la région pour diminuer la capacité d'investissement et la force de travail afin d'augmenter la taille de pâturage et l'alimentation des zébus.

En somme, le libellé final du risque pour le système pâturage est donc le « Risque de pénurie de fourrage pour les éleveurs de bovins » (cf. figure 13, encadré grenat).

4.2.2.2 Danger et impacts immédiats (Danger) sur le système de pâturage

Les dangers qui peuvent attaquer le système pâturage se base surtout par les signaux climatiques qui sont les températures trop élevées, les épisodes pluvieux trop intenses et les précipitations trop faibles. Les impacts physiques directs de ces signaux sont les inondations soudaines et les sècheresses (cf. figure 13, encadrés bleu clair).

Les impacts intermédiaires causant le(s) risque(s) de pénurie de fourrage pour les éleveurs bovins sont caractérisés par l'érosion qui permet de transporter des pertes en terre endommageant les fourrages des bas-fonds ; ainsi que l'eau d'irrigation et pluviale insuffisantes pour les pâturages qui diminuent la production des fourrages et le dessèchement des fourrages (cf. figure 13, encadrés gris).

Les indicateurs de danger sont surtout composés du nombre de jours dont la température moyenne est supérieure à 35°C correspondant à une température trop élevée. Par la suite vient le nombre de mois avec des précipitations inférieures à 50 mm correspondant à une précipitation faible. Enfin, il y a le nombre de jours avec inondations soudaines et l'indice de précipitations standards pour connaitre s'il y a des sècheresses (cf. figure 13, encadré bleu marine).

Ces indicateurs sont appliqués dans des modèles tels élaborés par Christoph et al en 2020 :

- ✓ Pour les températures moyennes annuelles, le nombre annuel de jours très chauds (jours avec température du maximum journalière au-dessus de 35 °C) est projeté pour augmenter substantiellement et avec haute certitude, en particulier dans la région ouest de Madagascar où se situe la région Boeny. Sous le scénario des émissions du « medium/high RCP6.0 »[6], le multi-modèle a projeté en moyenne sur le pays entier, plus de 5 jours très chauds par année en 2000 qu'en 2030.
- ✓ Pour la précipitation, pendant la saison sèche, du mai en octobre, le danger est perçu dans la région avec une précipitation inférieure à 50 mm et cela s'accentue due au changement climatique. Les projections futures de précipitations sont moins certaines que les projections de changement de température en raison de fortes variations naturelles d'une année à l'autre. Les projections médianes du modèle montrent une diminution des précipitations de 114 mm par an d'ici 2080 sous RCP6.0.

Enfin, pour le nombre de jours avec inondation soudaine, les modèles climatiques prévoient une légère augmentation du nombre de jours avec de fortes précipitations, à partir de 7,0 jours par an du 2000 à 7,2 jours par an en 2080 sous RCP6.0.

4.2.2.3 Vulnérabilité du système de pâturage

Le système de pâturage est très vulnérable face au changement climatique. Les caractéristiques qui rendent le système vulnérable aux impacts négatifs potentiels des dangers considérés sont surtout le fort taux de déforestation dans la région Boeny avec un taux de perte de 0,8% par an (ONE et al, 2011). Le type de sol défavorable dénudé avec des sols fragiles (sols ferrugineux) et les reliefs escarpés contribuent fortement à augmenter l'emprise de l'érosion hydrique et de la production fourragère non viable dans la région (cf. figure 13, encadré vert contour vert). De plus, la capacité défaillante sur le système sociétal permettant de réduire le risque de pénurie de fourrage est basée sur l'insuffisance de savoir-faire technique sur la gestion des terres. Ensuite, Il existe un accès difficile aux fourrages et une faible capacité à utiliser des fourrages améliorés par le manque des éleveurs investissant dans le système de culture fourragère à environ une étendue de 3,7% de la superficie totale de pâturage (cf. figure 2, encadré vert contour orange).

Lors du choix des indicateurs de sensibilité et de capacité, il est important de connaître la direction de chaque indicateur (si une valeur élevée représente un risque élevé ou un risque faible).

Pour les indicateurs de la composante capacité de la vulnérabilité, la capacité à faire face et de la capacité d'adaptation ont été tenues en compte. Pour cela, les indicateurs sont la superficie des zones déboisées, l'érodibilité, la capacité de retention d'eau, la quantité (kg) de fourrage par animal par an, le nombre des éleveurs formés aux techniques de gestion des terres et le pourcentage de revenu disponible pour investir dans des cultures fourragères (cf. figure 13, encadré vert foncé).

4.2.2.4 Facteurs de l'exposition du système pâturage

Les facteurs appropriés pour le système pâturage sont les terres de culture fourragère par les éleveurs de bovins et le nombre des éleveurs de bovins traditionnels. Plus le nombre des éleveurs de bovins ne cultivant pas des fourrages est bas, plus le risque est élevé parce que les pâturages naturels tendent

---

Scénario des émissions du « medium/high RCP6.0 »[6] : « *Representative Concentration Pathway* » en anglais ou « Trajectoires représentatives de concentration » en français, est un scénario de trajectoire du forçage radiatif de 6 W/m^2 (Watt par mètre carré) jusqu'à l'horizon 2100. Il permet de modéliser le climat futur.

vers la dégradation. Ajouté à cela, les espèces de fourrages améliorés résistent beaucoup à la sècheresse et gardent sa verdure même pendant la saison sèche.

Pour ce qui est de l'exposition, les indicateurs utiles sont généralement la surface en hectare des cultures de fourrage amélioré par l'ensemble des pâturages et le pourcentage (%) des éleveurs pratiquant l'élevage traditionnel par l'ensemble des éleveurs de bovins (cf. figure 13, encadré jaune).

Dans les communes d'interventions, seulement 17 éleveurs pratiquent la culture fourragère et le reste adopte l'élevage traditionnel et ne dépend que des savanes indigènes pour l'alimentation des zébus. De plus, le système reste encore semi-amélioré dans la région parce que même ceux qui se lancent à l'utilisation des espèces fourragères améliorées utilisent également les savanes indigènes à plus de 95%.

4.2.2.5 Mesures d'adaptation

L'analyse de vulnérabilité est le point de départ du lancement de mesures d'adaptation, et peut servir d'outil utile de confrontation avec la réalité. Cette chaine d'impact a comme mesures d'adaptation de former les éleveurs sur les techniques de gestion des terres et à utiliser les cultures fourragères (cf. figure 13, bulle grise).

Les stratégies et innovations techniques déjà mises en place par les éleveurs sont la gestion des feux et des paysages autour et à l'intérieur des aires protégées dont principalement Ankarafantsika, par l'installation des pare-feux pour lutter contre la propagation des feux.

L'augmentation de la superficie des zones reboisées dans la région de Boeny est également une forme de technique de gestion de terre qui permet de lutter contre la dégradation des terres afin de contribuer aux systèmes de pâturage (même sur des systèmes mixtes intégrant les arbres et/ou les arbustes). Des sensibilisations et des reboisements sont déjà mis en place par les communautés locales pour lutter contre le changement climatique.

De plus, une des stratégies adoptées par les éleveurs est le renforcement de sécurité par le DINA qui est une sorte de contrat social traditionnel adopté par les autorités administratives et judiciaires. Pour cela, tout individu pris en flagrant délit de vol de bœufs paiera une amende de 500 000 ariary, et les transhumants qui utilisent les lieux de pâturage communal paieront une amende de 50 000 ariary.

Pour l'élevage, l'apport de résidus de récolte sur l'alimentation des zébus, la culture fourragère dans les bas-fonds et le rapprochement des zébus auprès du village sont des stratégies adoptées par les éleveurs. Face aux maladies des zébus, la majorité des paysans utilisent des médicaments traditionnels ou les « ady gasy » à base de plantes dont les espèces *Ageratum conyzoides* (ou « be maimbo »).

4.3 Contribution du système de pâturage au changement climatique par le bilan carbone

4.3.1 Variation des stocks de carbone dans le système de pâturages

L'élevage bovin est associé à des surfaces de pâturage qui constituent un potentiel de stockage de carbone. Le pâturage synthétise de la matière organique à partir du CO_2 prélevé dans l'atmosphère, grâce à la photosynthèse. Une fraction importante de cette biomasse (feuilles, racines) et de ces résidus est incorporée au sol. Du carbone organique peut ainsi être stocké en profondeur dans le sol.

4.3.1.1 Variation de stocks de carbone des savanes indigènes

La variation de stocks de carbone des savanes indigènes se repose sur le carbone organique du sol. Pour cela, il est important d'appliquer l'équation 3 (cf. 3.4.3.1) pour connaitre la variation annuelle des stocks de carbone notée $\Delta C_{PP(savanes\text{-}indigènes)}$ dans les savanes indigènes en tonnes C an^{-1}.

Sachant que :

- COS_{si2023} = 36.24 t C ha^{-1} (cf. 4.1) est le stock de COS de pâturage traditionnel en laboratoire.
- la valeur de référence par défaut pour les stocks de COS (COS_{ref} = 31 t C ha^{-1}) est utilisée pour calculer le COS_{si2022} car la valeur de COS en 2022 n'est pas issue des valeurs au laboratoire,
- Les facteurs de variations pour toute utilisation des terres F_{UT} = 1 (GIEC, 2003).
- Les facteurs de variations pour la gestion du pâturage indigène des terres F_{RG} = 0,97 car moyennement dégradée et adimensionnel (GIEC, 2003).

  Ainsi, $COS_{si2022} = COS_{ref} * F_{UT} * F_{RG}$ est le stock de COS en 2022.

- La surface utilisée est S_{si} = 1384,87 ha correspondant à 96,24 % de superficie des pâturages totale utilisé.
- T = 2023-2022=1 an

Ainsi, en appliquant l'équation 3, la formule adaptée à l'étude de cas se réécrit comme suit :

$$\Delta C_{PP_{savanes-indigènes}} = \frac{[(COS_{si\ 2023} - COS_{(2022)}) \times S_{si}]}{T}$$

Ce calcul aboutit à la variation de STOCKS DE CARBONE DES SAVANES INDIGENES utilisés par les éleveurs enquêtés de 8544,65 t C an^{-1} soit 31,33 Gg/an.

4.3.1.2 Variation de stocks de carbone (COS) des pâturages améliorés

La variation de stocks de carbone des pâturages améliorés notée $\Delta C_{PP\ (fourrages\ améliorés)}$ se repose sur la somme des stocks de carbone du sol (équation 3) et de la biomasse (équation 4 et 5) (cf. 3.4.3.1) pour connaitre la variation annuelle des stocks de carbone dans les fourrages améliorés en t C an^{-1}.

➢ Variation de stock de carbone organique du sol des fourrages améliorés

Sachant que :

- COS_{fa2023} = 55,17 t C ha^{-1} (cf. 4.1) est le stock de COS de fourrage amélioré en laboratoire.
- COS_{fa2022} = $COS_{ref} * F_{UT} * F_{RG} * F_A$ est le stock de COS en 2022.
- la valeur de référence par défaut pour les stocks de COS (COS_{ref} = 31 t C ha^{-1}) utilisée pour calculer le COS_{fa2022}. (non issue d'analyses au laboratoire)
- F_{UT} = 1 pour tout utilisation des terres (GIEC, 2003)
- F_{RG} = 1,1 parce que la gestion du pâturage est améliorée (GIEC, 2003)
- F_A = 1,11 parce qu'il y a apport de matière organique dans les pâturages améliorées (GIEC, 2003)
- S_{fa} = 54,14 ha est la surface utilisée correspondant à 3,76 % de superficie des pâturages totale utilisés.
- T = 2023-2022=1 an

L'équation pour calculer la variation de stocks de carbone du sol des pâturages s'écrit comme suit :

$$\Delta C_{PP_{fourrages\ améliorés}} = \frac{[(COS_{fa\,2023} - COS_{fa2022}) \times S_{fa}]}{T}$$

Après calcul, la variation des stocks de carbone organique du sol des fourrages améliorés obtenue est de 937,65 t C an-1 (ou 3,438 Gg/an).

- Variation de stock de carbone de la biomasse des fourrages améliorés

La variation de stocks de carbone de la biomasse des pâturages améliorés utilise les équations 4 et 5 (cf. 3.4.3.1) (GIEC, 2003).

$$\Delta C_{PP_{BV(c,i,g)}} = (\Delta B_{vivace} + \Delta B_{herbacées\ graminées}) \times FC$$

Dans cette équation, $\Delta C_{PP_{BV(c,i,g)}}$ correspond à la variation des stocks de carbone de la biomasse vivante pour le mélange de *Stylosanthes spp.* et de *Brachiaria spp.* (i), dans la zone climatique tropicale semi-humide de Boeny (c), et régime de gestion de pâturage amélioré (g), en t C an^{-1}

Comme les éleveurs enquêtés n'introduisent pas la biomasse ligneuse vivace comme alimentation des zébus, la formule devient :

$$\Delta C_{PP_{BV(c,i,g)}} = (\Delta B_{herbacées\ graminées}) \times FC$$

Avec :

$\Delta B_{herbacées\ graminées}$ = variation de la biomasse souterraine d'herbacées graminées, en t m.s. an^{-1}

FC = 0.5 t C (t m.s.)$^{-1}$ est la valeur par défaut de fraction de carbone de la matière sèche.

On peut estimer les variations pour la biomasse vivante ($\Delta B_{stylosanthès\ brachiaria}$) avec les stocks de biomasse pour les années 2023 et 2022 (Équation 5) :

$$\Delta B = \frac{(B_{2023} - B_{2022})}{(2023 - 2022)}$$

L'estimation par défaut pour la biomasse sur pied des pâturages notée **B** dans les régions tropicales sèches comme Boeny est de 2,3 t.m.s.ha^{-1}, donc la biomasse vivante des pâturages est en fonction des superficies de la culture fourragère en 2022 et 2023 connues lors de l'entretien avec les éleveurs, avec

B_{2023} = 2,3 t.m.s.ha^{-1} * 54.14 ha= 124,52 t m.s.

B_{2022} = 2,3 t.m.s.ha^{-1} * 53.62 ha= 123,33 t m.s.

Ce qui donne la valeur de **$\Delta B_{herbacées\ graminées}$ égale à 1,19 t m.s. an^{-1}**

En appliquant la formule $\Delta C_{PP_{BV(c,i,g)}}$, la variation de stocks de carbone de la biomasse des fourrages améliorés obtenue est de 0,6 t C an^{-1} (ou 0,002 Gg/an).

La variation de STOCKS DE CARBONE DES PATURAGES AMELIORES utilisés par les éleveurs enquêtés est donc la somme de stock de COS et de biomasse qui s'élève à 938,25 t C an-1 (ou 3,44 Gg/an).

➢ Estimation de stock de carbone dans le système des pâturages entre 2022 et 2023

En somme, la variation de stocks de carbone dans le système des pâturages utilisés par les éleveurs enquêtés entre l'année 2022 et 2023 est donc la combinaison de variation pour les savanes indigènes (COS) et les fourrages améliorés (COS et biomasse) et s'élève à 9482,9 t C an^{-1} qui est égal à 34,77 Gg $CO_{2éq}$ /an (cf. figure 14) ;

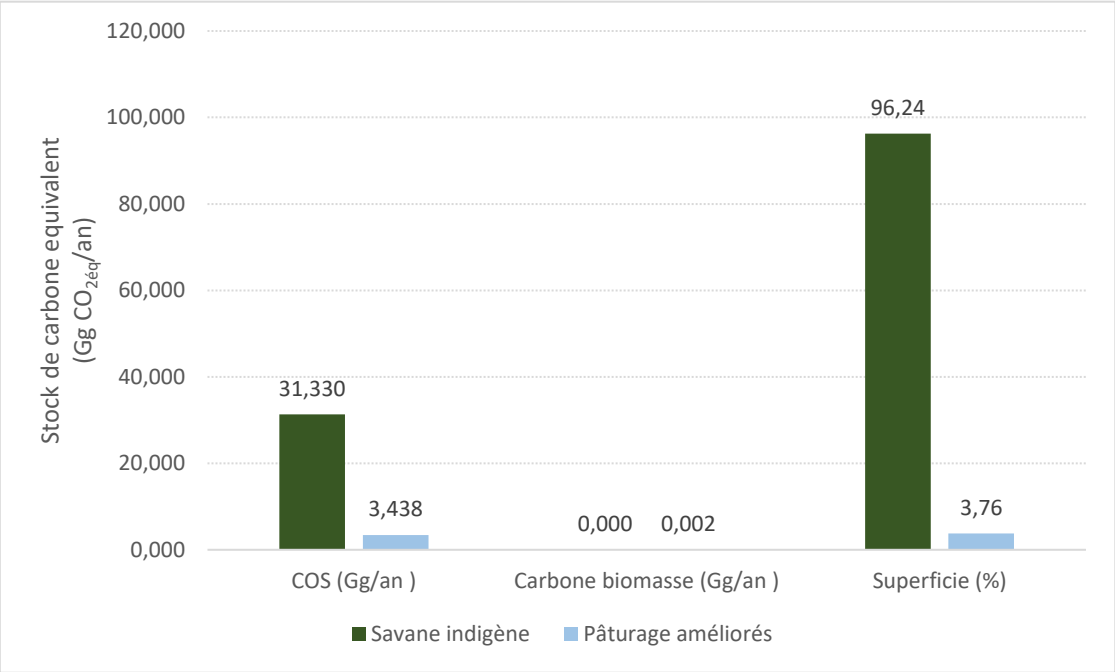


Figure 14: Stock de carbone équivalent du système de pâturage

4.3.2 Emissions de GES du système de pâturage

Le méthane est le principal GES issu de l'élevage bovin. Il est émis naturellement lors de la digestion de l'herbe et des fourrages. Il est surtout présent dans le rumen et secrété par des bactéries dites « méthanogènes » qui permettent aux herbivores de digérer les longues fibres des végétaux et de les transformer en nutriments utiles. Le méthane émis est finalement une perte naturelle et nécessaire à la production.

L'émission annuelle de méthane due à la fermentation entérique des zébus est donc calculée, pour les 1357 zébus recensés, par la formule de l'équation 6 (cf. 3.4.3.2) (GIEC, 2006) :

$$Emissions = FE_{(T)} \times \left(\frac{N_{(T)}}{10^6}\right)$$

Sachant que :

- Le Facteur d'émissions annuel de la catégorie de bétail définie **FE(T) est de** 35,68 kg CH_4 /tête/an (si il est de 97,74 g/ tête/j)(GBENOU et al, 2022)
- Le nombre de têtes ou **N(T)** est de 1357

L'émission de méthane due à la fermentation entérique des zébus dans les communes d'intervention est donc 48,41 t CH_4 /an.

4.3.3 Bilan carbone équivalent du système de pâturage

Pour estimer le bilan carbone équivalent du système pâturage, les unités de stocks et des émissions de carbone sont exprimées en gigagrammes (Gg) et en carbone équivalent (**$CO_{2éq}$**).

Pour convertir les tonnes C en Gg CO_2, il faut multiplier la valeur de stock de carbone 9482,9 t C an^{-1} par 44/12 et 10^{-3}. Si la variation **de stocks de carbone dans le système des pâturages utilisés par les éleveurs enquêtés** trouvée est de **9482,9 t C an^{-1}, son équivalent en CO_2 équivalent** est égal à **34,77 Gg $CO_{2éq}$ /an.**

Pour convertir CH_4 en $CO_{2éq}$, il faut le multiplier par 25. Par conséquent, la valeur de l'émission en carbone équivalent de méthane est donc **1210,28 t $CO_{2éq}$ /an équivaut à 4,44 Gg $CO_{2éq}$ /an.**

Toutefois, les émissions liées à la fermentation entérique représentent la part la plus importante de l'ordre de 70% (DOLLE, GAC et LE GALL, 2009). Pour cela, l'émission totale de l'activité d'élevage (100%) s'élève donc à **6,34 Gg $CO_{2éq}$ /an**

En somme, pour le système de pâturage composé par 96,24% de pâturage indigène avec une régime de gestion de pâturage moyennement dégradé et 3,76% de fourrages améliorés, le bilan carbone équivalent est positif de l'ordre de 28,43 Gg $CO_{2éq}$ /an entre les années 2022 et 2023 (Cf. tableau 6 et figure 15).

Tableau 6: Caractéristiques du système de pâturage et bilan carbone

Pratique de pâturage	Pâturage indigène	Pâturage amélioré
Superficie (%)	96,24	3,76
Type d'utilisation des terre (F_{UT})	1	1
Régime de gestion du pâturage (F_{RG})	0,97 (moyennement dégradé)	1,1 (amélioré)
Apport de matière organique du sol (F_A)	Sans apport	1 (Nominal)
Stock de carbone équivalent (Gg $CO_{2éq}$ /an)	34,77	
Emission de carbone équivalent (Gg $CO_{2éq}$ /an)	- 6,34	
Bilan carbone équivalent (Gg $CO_{2éq}$ /an)	28,43	

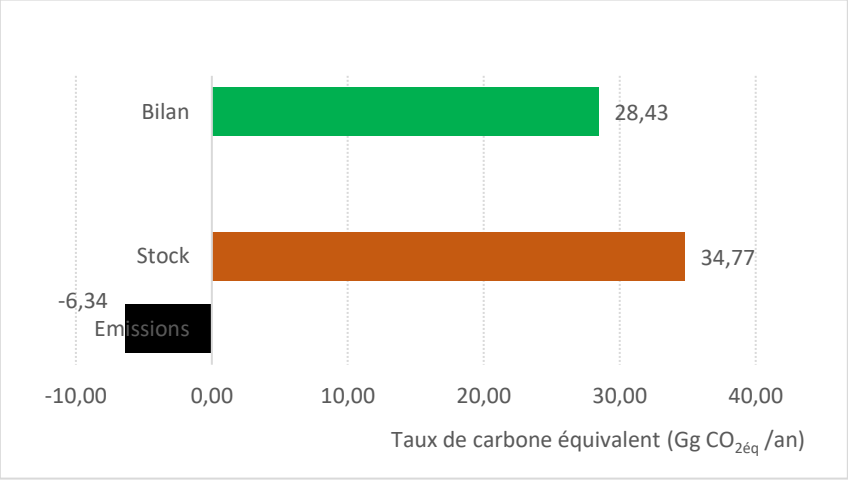


Figure 15: Bilan carbone équivalent du système pâturage (utilisation de 3,76% de fourrage amélioré)

4.4 Modélisation des scénarii d'inaction et d'action liées aux cultures fourragères

Pour évaluer les risques futurs, les risques climatiques futurs et les conditions socio-économiques futures doivent être tenus en compte.
Pour les principaux facteurs, outre le climat, le feu de pâturage qui peuvent conduire à la forte dégradation du pâturage et la culture fourragère qui fait partie des techniques de gestion des terres pourraient influer sur les risques actuels et futurs liés au climat.
Pour cela, pour voir l'évolution du bilan carbone dans le futur, quelques scénarios sont à présenter dont un avec 0% de changement de superficie de culture fourragère et dégradation forte de pâturage indigène et d'autres en fonction de la superficie de culture fourragère tout en l'augmentant de 2% par an et 10% par an jusqu'à 2030.

4.4.1 Modélisations des scénarii d'inaction avec pâturage traditionnel fortement dégradé

Des prédictions de l'évolution de bilan carbone ont été effectuées à travers des modélisations avec intégration de facteurs de régime de gestion de pâturage indigène moyennement dégradé jusqu'en 2030 et 2050 et fortement dégradé jusqu'en 2080 s'il n'y a pas d'action.
Pour cela, les bilans deviennent négatifs avec des estimations d'émission de l'ordre de 3,15 Gg $CO_{2éq}$ /an jusqu'en 2030 (cf. figure 16), 6,46 Gg $CO_{2éq}$ /an jusqu'en 2050 (cf. figure 17) et 26,96 Gg $CO_{2éq}$ /an si aucune action contre la dégradation des pâturages ne sera prise jusqu'en 2080 (cf. figure 18).

Ces scénarii sont issus des situations que pourrait faire face le système de pâturage bovin sous le scénario GIEC de dominance depuis une situation moyennement dégradée actuelle jusqu'en 2050 et de pâturage fortement dégradé jusqu'en 2080. Les facteurs d'impact climatique dans la région Boeny tels élaborés par Stephanie G. et al en 2022 sont appliqués dans ces modèles :

- ✓ Pour les températures moyennes annuelles, les modèles prévoient un réchauffement supérieur à 2 °C en cas de non-atténuation (RCP 7,0[7]) c'est-à-dire la température reste toujours en bas du seuil maximum (35 °C) pour le dessèchement des fourrages d'ici 2080.
- ✓ Pour la précipitation moyenne annuelle, les projections du modèle vont à peu près de -20 à 5 % par rapport à 2000 sur une grande partie du 21ème siècle dans la région Boeny. De plus, pour le nombre de jours de fortes précipitations, les modèles climatiques prévoient que la plage des projections du modèle se situe approximativement entre -4 et +3 jours par an. Aussi, pour l'intensité des précipitations pour Boeny, les modèles prévoient une grande variation entre une baisse allant jusqu'à 25 % et une augmentation allant jusqu'à 13 % tout au long du 21ème siècle, c'est à dire plus de 80 mm de précipitation par mois sont distinguées. Par conséquent, le danger n'est pas encore perçu dans la région avec une précipitation encore supérieure au seuil de 50 mm par mois jusqu'en 2080. En effet, les projections futures de précipitations n'affectent pas donc le changement du système de pâturage actuel.
- ✓ Concernant le nombre annuel de jours très chauds (jours avec température du maximum journalière au-dessus 35 °C), tous les modèles s'accordent sur une augmentation des journées très chaudes, entre 7 et 70 jours selon RCP 2.6[8] et entre 60 et 230 jours dans le scénario RCP 7.0 d'ici 2080. Pour le nombre de mois extrêmement sec, la meilleure estimation de la variation moyenne projetée pour Boeny est d'environ 2 mois de plus dans le scénario RCP 2,6 et de 6 mois de plus selon RCP 7.0 d'ici 2080. Ainsi, ces facteurs assureront les passages du **pâturage indigène nominal en moyennement dégradé jusqu'en 2030 et 2050 et au pâturage fortement dégradé jusqu'en 2080 avec un risque élevé de pénurie de fourrage**.

RCP 7.0[7] : scénario de trajectoire du forçage radiatif de 7 W/m² jusqu'à l'horizon 2100.
RCP 2.6[8] : scénario de trajectoire du forçage radiatif de 2,6 W/m² jusqu'à l'horizon 2100.

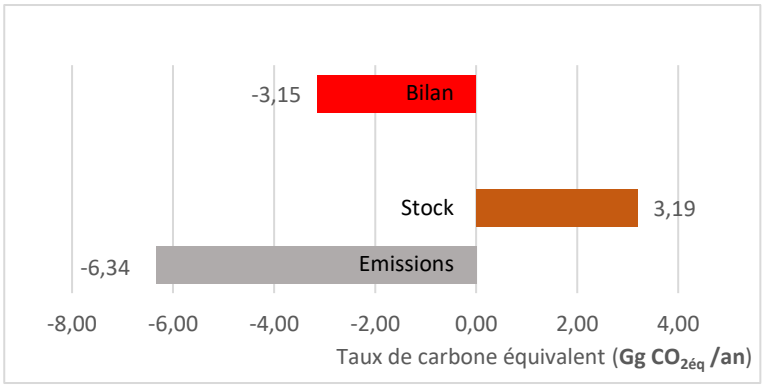


Figure 16: Bilan carbone équivalent du système pâturage scénario d'inaction jusqu'en 2030

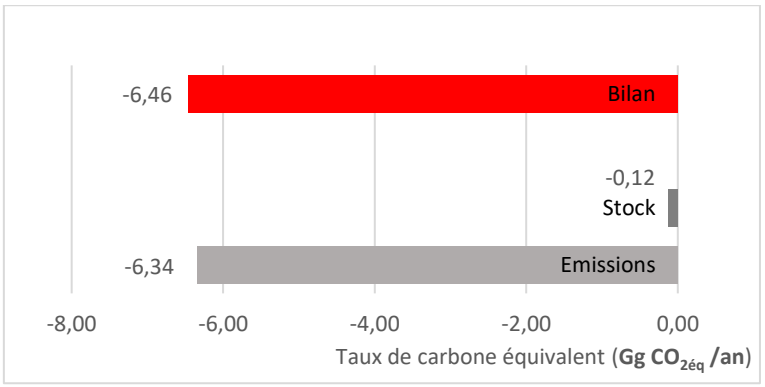


Figure 17: Bilan carbone équivalent du système pâturage scénario d'inaction jusqu'en 2050

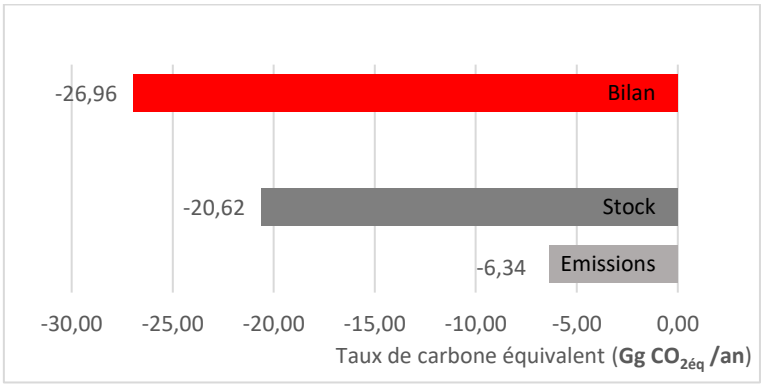


Figure 18: Bilan carbone équivalent du système pâturage scénario d'inaction jusqu'en 2080

4.4.2 Modélisation d'un scénario d'augmentation de superficie de culture fourragère

Compte tenu de la modélisation de superficie de culture fourragère, des évolutions de bilan carbone de 38,37 Gg $CO_{2éq}$ /an et 78,10 Gg $CO_{2éq}$ /an sont observées pour une augmentation de la superficie de culture fourragère respectivement de 2% par an (cf. figure 19) et 10% par an (cf. figure 20) jusqu'à 2030.

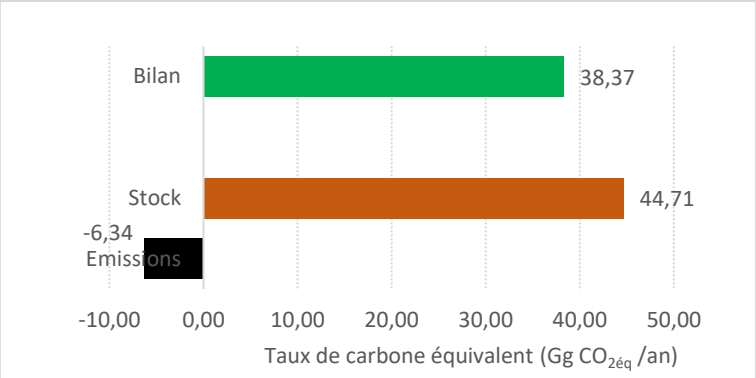


Figure 19: Bilan carbone équivalent du système pâturage avec une augmentation de 2% par an de superficie de culture fourragère jusqu'à 2030

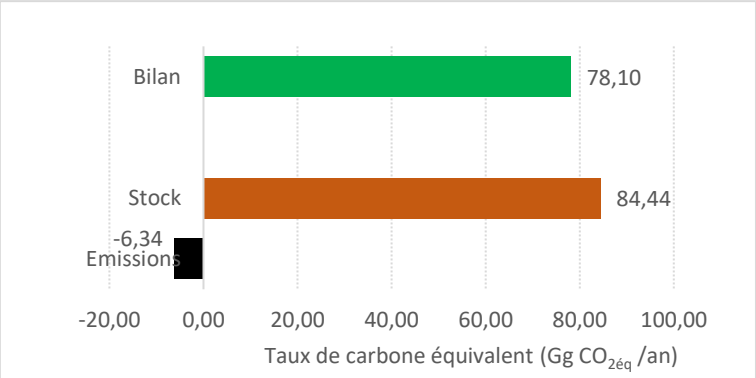


Figure 20: Bilan carbone équivalent du système pâturage avec une augmentation de 10% par an de superficie de culture fourragère jusqu'à 2030

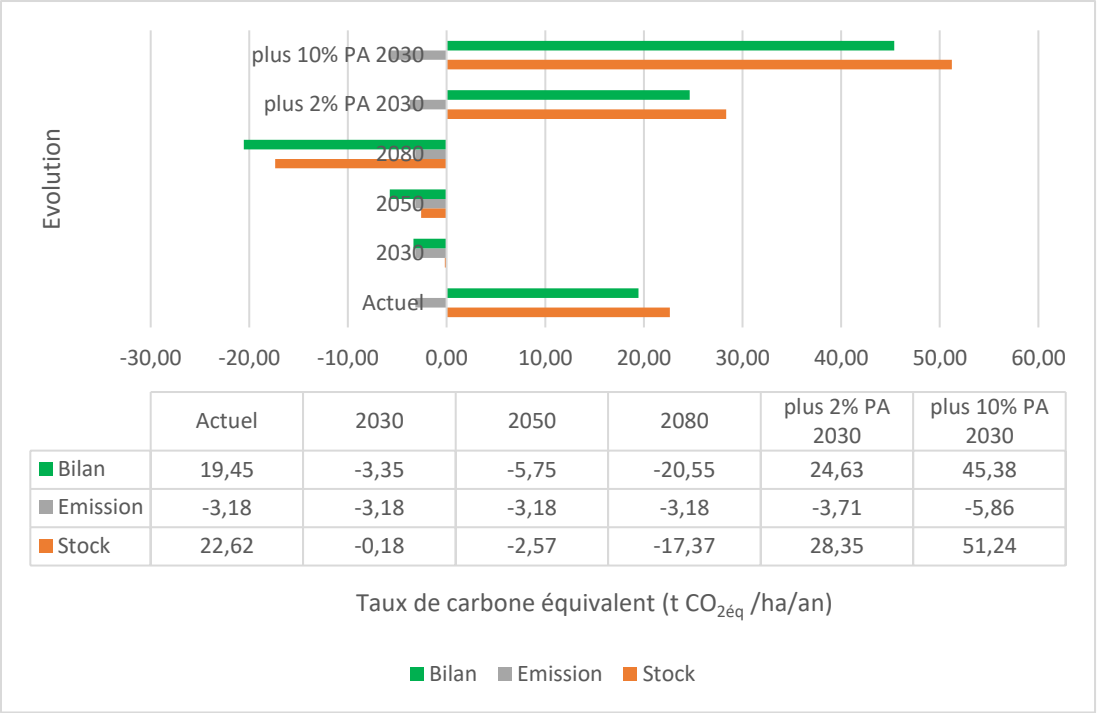
4.4.3 Evolution des bilans carbone (en t $CO_{2éq}$ /ha/an) par scénarii d'action et d'inaction pour les pâturages traditionnels

Les prédictions de l'évolution de bilan carbone ont été effectuées également à travers les modélisations avec intégration de facteurs de régime de gestion de pâturage indigène moyennement dégradé jusqu'en 2030 et 2050 et fortement dégradé jusqu'en 2080 s'il n'y a pas d'action.

Pour le bilan carbone par hectare, la capacité de charge des différentes parcelles de pâturage à exploiter est nécessaire. Pour cette étude, les capacités de charges des zébus à employer s'élèvent à 0,68 UBT/ha et 1,5 UBT/ha respectivement pour les pâturages traditionnels (*Hyparrhenia sp.* et *Aristida sp*.) et les pâturages améliorés (*Brachiaria sp.)* (RAZAFINARIVO T. D., 2018).

Si on suppose que les pâturages utilisés par les éleveurs ne sont que des pâturages traditionnels, le bilan actuel reste positif (19,45 t $CO_{2éq}$/ha/an) mais ce bilan positif est instable s'il n'y a pas d'action et devient négatif avec des estimations d'émission de l'ordre de 3,35 t $CO_{2éq}$ /ha/an jusqu'en 2030 ; 5,75 t $CO_{2éq}$ /ha/an jusqu'en 2050 et 20,55 t $CO_{2éq}$ /ha/an si aucune action contre la dégradation des pâturages ne sera prise jusqu'en 2080 (cf. figure 21).

En raison de la modélisation de superficie de culture fourragère, des évolutions de bilan carbone de 24,63 t $CO_{2éq}$ /ha/an et 45,38 t $CO_{2éq}$ /ha/an sont observées pour une augmentation de la superficie de culture fourragère respectivement de 2% par an et 10% par an jusqu'à 2030 (cf. figure 21).



	Actuel	2030	2050	2080	plus 2% PA 2030	plus 10% PA 2030
Bilan	19,45	-3,35	-5,75	-20,55	24,63	45,38
Emission	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,71	-5,86
Stock	22,62	-0,18	-2,57	-17,37	28,35	51,24

Figure 21: Evolution de bilan carbone équivalent en t $CO_{2éq}$ /ha/an pour utilisation de 100% fourrage traditionnel (inaction) et augmentation de fourrage amélioré de 2% et 4%(action)

4.4.4 Evolution des bilans carbone (en t $CO_{2éq}$ /ha/an) par scénarii d'action et d'inaction pour le système pâturage actuel dans les zones d'interventions

Le système de pâturage composé par 96,24% de pâturage indigène avec une régime de gestion de pâturage moyennement dégradé et 3,76% de fourrages améliorés possède actuellement un bilan de carbone équivalent positif de l'ordre de 20,84 t $CO_{2éq}$ /ha/an.

Ce bilan positif est ainsi instable s'il n'y a pas d'action et devient négatif avec des estimations d'émission de l'ordre de 1,10 t $CO_{2éq}$ /ha/an jusqu'en 2030 ; 3,41 t $CO_{2éq}$ /ha/an jusqu'en 2050 et 17,65 t $CO_{2éq}$ /ha/an si aucune action contre la dégradation des pâturages ne sera prise jusqu'en 2080 (cf. figure 22).

Tout en considérant la modélisation de superficie de culture fourragère avec une augmentation de 2% par an et 10% par an jusqu'à 2030, les évolutions de bilan carbone sont respectivement de 26,03 t $CO_{2éq}$ /ha/an et 46,77 t $CO_{2éq}$ /ha/an (cf. figure 22).

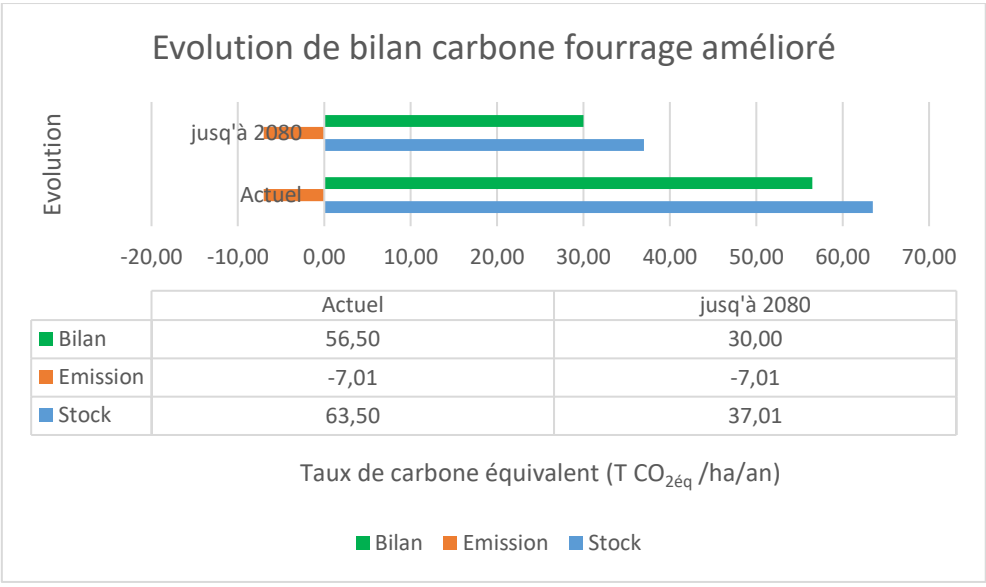
	Actuel	2030	2050	2080	plus 2% PA 2030	plus 10% PA 2030
Bilan	20,84	-1,10	-3,41	-17,65	26,03	46,77
Emission	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32	-3,86	-6,00
Stock	24,16	2,22	-0,09	-14,33	29,88	52,78

Figure 22: Evolution du bilan carbone équivalent en t $CO_{2éq}$ /ha/an du système pâturage (utilisation de 3,76% de fourrage amélioré)

4.4.5 Evolution des bilans carbone (en t $CO_{2éq}$ /ha/an) par scénarii d'inaction sur le système de pâturage amélioré

Le système de pâturage 100% améliorés ce qui est un cas extrême (dans la situation actuelle) possède un bilan carbone équivalent positif de l'ordre de 56,50 t $CO_{2éq}$ /ha/an.

Ce bilan reste positif allant de 30,00 t $CO_{2éq}$ /ha/an depuis la situation améliorée actuelle vers un pâturage moyennement dégradé si aucune action contre la dégradation des pâturages ne sera prise jusqu'en 2080 (cf. figure 23).



	Actuel	jusq'à 2080
Bilan	56,50	30,00
Emission	-7,01	-7,01
Stock	63,50	37,01

Figure 23: Evolution des bilans carbone (en t CO2éq /ha/an) par scénarii d'inaction du système de pâturage (100%) amélioré

4.5 Teneur en éléments principaux dans le sol (Azote total, Phosphore, Potassium) par type de pâturage

4.5.1 Azote total du sol par type de pâturage

D'après les tests de Mann-Whitney, aucune différence significative n'a été révélée entre les concentrations en azote total des sols sous le pâturage traditionnel composé de *Hyparrhenia sp* et *Aristida sp*. (2,35 ±1,61 g N/kg) et sous le pâturage amélioré composé de *Brachiaria sp.* et de *Stylosanthes sp.* (2,72 ±2,21 g N/kg) avec p-value= 0,0658 (cf. figure 24). Ces résultats suggèrent que les fourrages améliorés n'ont pas eu d'impact significatif sur la concentration en azote total des sols. Cela peut être due à la présence de culture récente des pâturages améliorés de l'ordre d'une à deux année(s) depuis que le projet ProSol commence à vulgariser la culture fourragère dans la région. Cela favorise le lessivage de l'azote jusqu'à ce que le sol devienne plus stable après le développement du pâturage amélioré.

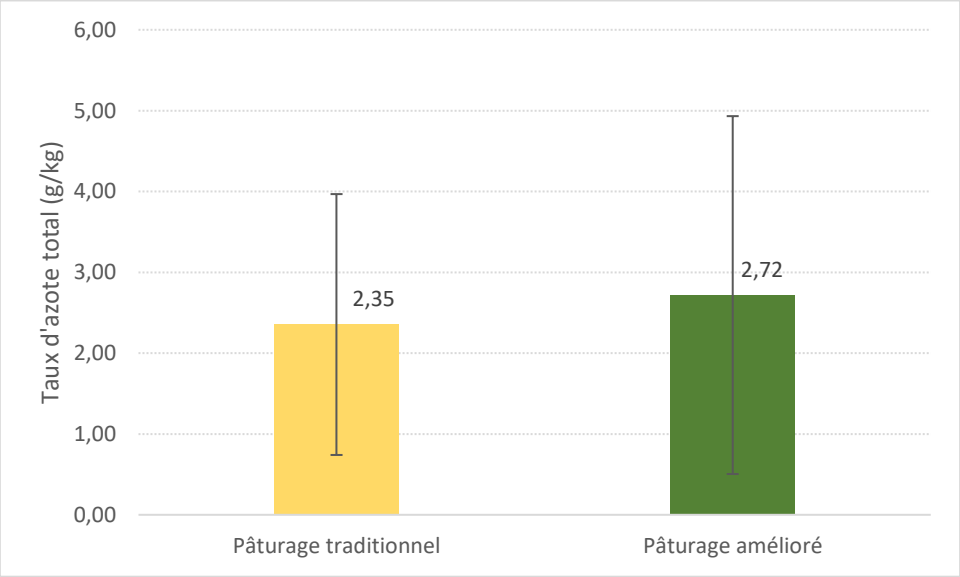


Figure 24 : Comparaison de la concentration en azote total dans les sols sous savanes indigènes et sous fourrages améliorés

4.5.2 Phosphore du sol par type de pâturage

Les niveaux de phosphore dans les sols sous les pâturages traditionnels (0,21 g P/kg) et sous les pâturages améliorés (0,19 g P/kg) ne présentent pas de différence significative, comme l'indique le test de Mann-Whitney (p-value = 0,287). Les pâturages traditionnels comprennent des espèces spontanées telles qu'*Hyparrhenia sp.* et *Aristida sp*. En revanche, les pâturages améliorés sont composés d'un mélange d'espèces introduites (*Brachiaria sp.* et *Stylosanthes* sp). Cette constatation suggère que du point de vue statistique, les deux types de pâturages n'ont pas influencé de manière significative les concentrations de phosphore dans le sol (cf. figure 25).

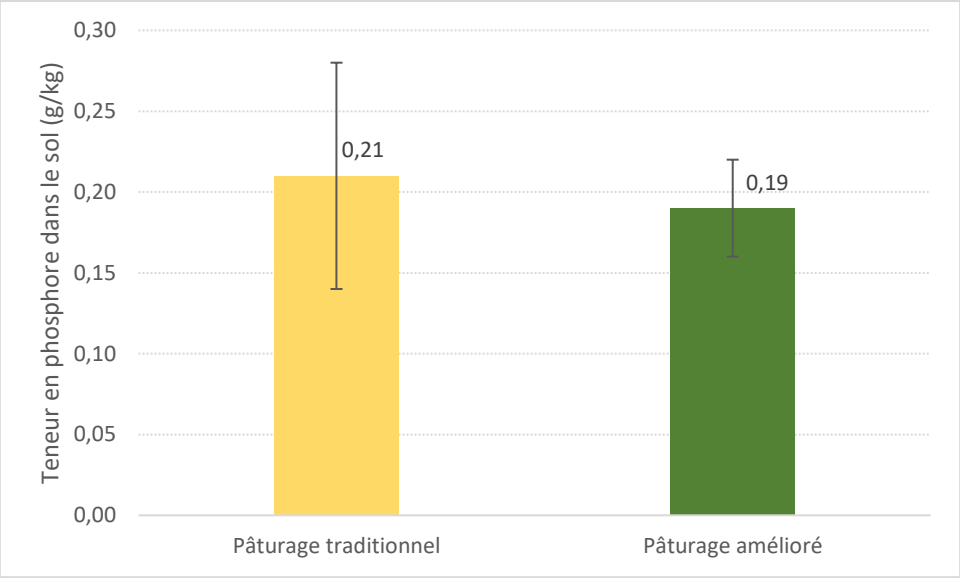


Figure 25 : Comparaison des masses de phosphore dans les sols sous pâturage traditionnel et sous pâturage amélioré

4.5.3 Potassium du sol par type de pâturage

Les sols sous pâturages traditionnels affichent une teneur en potassium notablement plus basse (0,064 g K/kg) que les sols sous pâturages améliorés (0,124 g K/kg), le test de Mann-Whitney confirmant l'existence de différence significative (p-value = 0,001) (cf. figure 26). Les pâturages traditionnels se composent principalement de végétation spontanée, tandis que les pâturages améliorés sont constitués d'un mélange d'espèces végétales introduites. Ces conclusions impliquent que l'introduction de ces diverses espèces (*Brachiaria sp.* et *Stylosanthes* sp.) a engendré une élévation marquée de la concentration en potassium dans les sols en comparaison avec les sols présents dans les pâturages traditionnels.

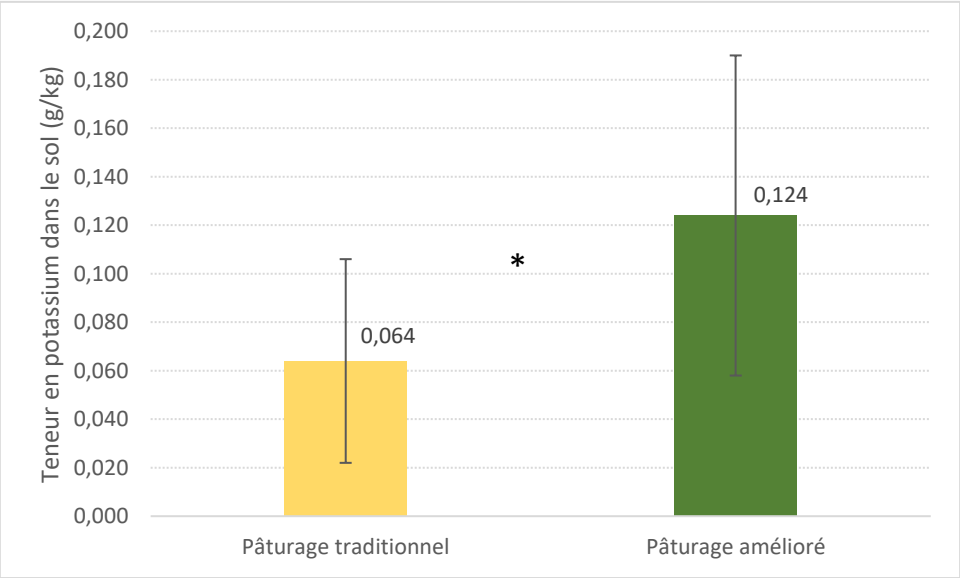


Figure 26 : Comparaison des teneurs en potassium dans les sols sous pâturage traditionnel et sous pâturage amélioré

5 DISCUSSIONS

5.1 Discussion sur la relation entre le carbone organique du sol et les pratiques de pâturage

La quantité de carbone dans les sols sous les pâturages traditionnels, prélevée entre 0 et 30 cm de profondeur, (36,24 t C/ha ou 11,01 g C/kg) est comparable au stock de carbone organique des sols ferrugineux (Oxisols) des régions sèches de Madagascar, mesurée par Grinand *et al*. (2009) et Grinand *et al*. (2017), respectivement de 33,6 et 38 t C/ha pour la même couche de sol. Et d'après Ratsimandresiarivo en 2019, les sols ferrugineux dominent la région Boeny. De plus, d'après les études de Vendrame *et al*. (2010) sur des pâturages dégradés sous sols ferrugineux (Latosols) au Brésil, des valeurs de carbone assez similaires à celles calculées dans cette étude, d'une moyenne de 14,3 g C/kg de sol ont été obtenues. Cependant, la quantité de carbone dans les sols sous les pâturages traditionnels est plus élevée que le stock de carbone dans les sols ferrugineux laissés en jachère et formés par *Aristida sp.* de Tuléar, comme étudié par Razafimbelo *et al*. (2010). Ces derniers ont rapporté un stock de 16,2 t C/ha pour cette couche de sol. Il est important de noter que le niveau de stockage de carbone dans le sol peut varier selon plusieurs facteurs, tels que les quantités et qualités des résidus restitués au sol, la structure du sol et la présence de la faune du sol (Razafimbelo *et al*., 2008) (Cf. figure 27).

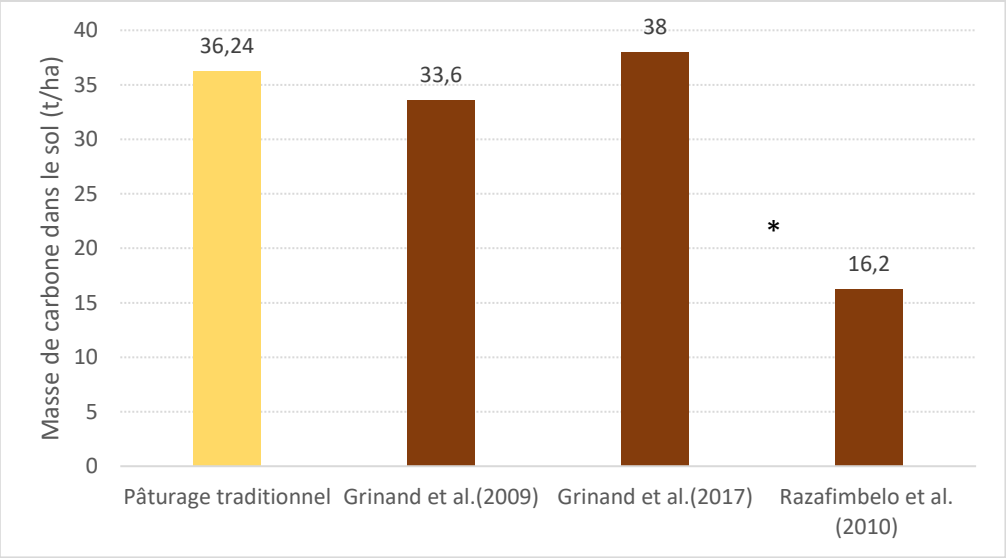


Figure 27 : Comparaison des masses de carbone dans les sols sous pâturage traditionnel avec d'autres études

Sous les pâturages améliorés, la quantité de carbone dans les sols, prélevée entre 0 et 30 cm de profondeur, (55,17 t C/ha ou 18,91 g C/kg de sol) est significativement inférieure aux teneurs en carbone permises en systèmes SCV (Systèmes de Culture Vivrière) avec couverture végétale vivante de graminées (*Pennisetum clandestinum*) et de légumineuses (*Desmodium uncinatum*) dans la région d'Antsirabe. Razafimbelo et al. (2006) ont mesuré des teneurs en carbone allant de 20,5 à 49,6 g C/kg de sol entre 0 et 30 cm de profondeur dans ces systèmes SCV suivis d'une restitution de résidus de culture (maïs et haricot/soja) de 123,1 à 140 t m.s. ha^{-1} au sol. Les sols d'Antsirabe présentent généralement des stocks de carbone élevés (Razafimbelo et al., 2010), ce qui explique ces teneurs élevées en carbone.

Néanmoins, cette présente étude met en évidence une différence significative entre la quantité de carbone dans les sols sous les pâturages améliorés et sous les pâturages traditionnels. Ces résultats

concordent avec ceux de l'étude de Rakotomampionona (2013), qui a également révélé une différence significative entre le stock de carbone dans les sols sous un sol cultivé de manière conventionnelle et sous un système de culture avec couverture végétale permanente de *Stylosanthes sp*.

5.2 Discussion sur le bilan carbone dans le système de pâturage

La présente étude a démontré que l'élevage de bovin possède la particularité de pouvoir compenser les émissions de GES grâce au stockage de carbone associé aux stocks de carbones des savanes indigènes et des espèces fourragères améliorées, malgré une performance relativement faible. Une étude antérieure confirme cette particularité de l'élevage bovin dans laquelle le bilan carbone reste positif dans le système pâturage malgré les émissions par la fermentation entérique (Dolle et al, 2013). Une autre étude (Timm T. et Andreas W., 2008), montre qu'avec des différentes gestions du système pâturage, le potentiel de fixation de carbone lié au culture fourragère peut varier de -12,1 à 46,50 t $CO_{2éq}$ /ha/an qui est assez similaire à la présente étude. Néanmoins, l'enjeu ici n'est pas d'utiliser le système à titre de compensation globale, mais plutôt d'éviter à ce que ceci devienne une source.

Il a été également établi une variabilité de bilan carbone entre systèmes en fonction du niveau d'optimisation des pratiques. En outre, l'augmentation de la surface de culture fourragère augmente la production de biomasse, et conséquemment peut améliorer les stockages de carbone dans les sols (GIEC, 2002). Le système pâturage lui-même contribue alors à l'auto compensation du bilan carbone si la gestion de pâturage est assurée pour que le système ne contribue pas au changement climatique.

5.3 Discussion sur les teneurs en éléments minéraux

5.3.1 Teneur en azote totale du sol

La concentration en azote total mesurée dans les sols sous savanes indigènes est comparable à la concentration moyenne en azote total des sols malgaches sous bozaka (ou herbe) trouvée par Rahantalalao en 2019. Cette concentration a une valeur moyenne d'azote total de 1,96 g N/kg, variant de 0,32 à 4,38 g N/kg.

Cette étude est comparable au résultat antérieur qui confirme que les teneurs en azote des parcelles sous pâturage ne présentent pas de différences significatives entre elles avec une variation de 2,5 à 3 g N/kg (Desjardins et al, 2000). L'absence de différence significative dans la concentration des sols en azote total sous savane indigène et sous pâturage amélioré pourrait s'expliquer par la culture récente des fourrages améliorées qui s'est déroulée durant une à deux année(s) d'exploitation. Pour cela, une étude antérieure a confirmé que l'association de Brachiaria avec des légumineuses contenant des bactéries fixatrices d'azote comme *Stylosanthès sp.* et son effet ne soient pas perceptibles avant une période plus longue (Husson et al., 2008a).

5.3.2 Teneur en phosphore du sol

La teneur en phosphore dans les sols sous les pâturages traditionnels, prélevée entre 0 et 30 cm de profondeur, (0,21 g P/kg) est semblable à la teneur en phosphore des sols prélevés sur des zones de *tanety* non encore cultivées au bord des routes nationales malgaches, dont RN4 (reliant Antananarivo-Majunga) pour la même couche de sol (0,2 à 0,43 g P/kg) (Raharimalala, 2013). La teneur moyenne en phosphore des sols sous pâturages traditionnels trouvée dans cette étude est assez similaire à celle de l'étude de Ramaroson (2017) sur des sols sous savanes proches des routes nationales malgaches, de l'ordre de 0,37 g P/kg de sol avec une teneur médiane de 0,26 g P/kg de sol.

La teneur en phosphore dans les sols sous pâturages améliorés est également similaire à celle trouvée par Agbenin et Anumonye en 2006 au nord du Niger (entre 0,17 à 0,24 g P/kg). Dans leur étude, les espèces concernées sont *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens*, *Chloris gayana*, *Digitaria smutsii* et *Stylosanthes guianensis*. Aussi, l'introduction d'espèces n'a pas permis d'améliorer la concentration en phosphore dans le sol.

5.3.3 Teneur en potassium du sol

La teneur en potassium dans les sols sous pâturages traditionnels, prélevée entre 0 et 30 cm de profondeur (0,064 g K/kg), est supérieure à la teneur en potassium des sols prélevés sur des savanes boisées (0,0036 g K/kg) au Sud-Ouest de Madagascar (Grouzis, Leprun et Randriambanona, 2003). Ces valeurs sont assez similaires à celle des sols prélevés le long des routes nationales malgaches, correspondant en partie à la région Boeny (0,08 g K/kg) (Andriamasy, 2015).

Dans cette étude, le pâturage amélioré présente une concentration en potassium significativement plus élevée (0,124 g K/kg ou 0,38 t K/ha) par rapport au pâturage traditionnel. Ce résultat suggère qu'il n'est pas lié par les plantations récentes mais aux retournements des terres avant la préparation. Certaines littératures suggèrent que les espèces introduites ont permis une augmentation des teneurs en potassium du sol à partir de la troisième année. La valeur calculée est assez similaire à celle trouvée par l'Institut International de la Potasse en 1974. Les sols sous *Panicum maximum*, *Centrosema pubescens* et *Stylosanthes guianensis* entre 0 et 25 cm de profondeur ont présenté une masse de 0,131 à 0,683 t K/ha. L'Institut a également pu établir, non seulement un bilan positif du potassium des sols sous ces espèces, mais aussi, l'augmentation des gains au cours du temps pour le cas des cultures de *Stylosanthes guianensis* sans engrais. L'espèce *Stylosanthes guianensis* présente moins de pouvoir d'absorption que ces graminées. Klein & César (1999) soulignent en outre que ce bilan positif en potassium peut être en rapport avec le haut potentiel d'absorption des graminées. Cela s'explique en partie par l'extension et la forte densité de leur système racinaire, qui prospecte un important volume de sol (Klein et César, 1999).

6 RECOMMANDATIONS

6.1 Recommandations sur le bilan carbone et le système de pâturage

À la suite de ces résultats, il est vivement recommandé d'encourager l'adoption de pâturages améliorés, constitués d'un mélange de *Brachiaria sp.* et *Stylosanthes sp.*. Des recherches récentes ont montré que les graminées tropicales, principalement des *Brachiaria*, ont la capacité d'inhiber la nitrification dans les sols, contribuant de cette façon à réduire les émissions d'un autre gaz à effet de serre important, l'oxyde nitreux (N_2O) (Klein et al, 2014). De plus, cette pratique joue un rôle essentiel dans l'augmentation de la masse de carbone dans les sols, et il est impératif de promouvoir son adoption pour maximiser la séquestration du carbone. Cette technique s'inscrit dans le cadre des pratiques agroécologiques en intégrant l'agriculture et l'élevage grâce à la fertilisation organique. Les pratiques agroécologiques contribuent significativement au maintien du statut organique des sols. Ce processus contribue finalement à la lutte contre le réchauffement climatique empêchant ainsi sa libération sous forme de CO_2 dans l'atmosphère (grâce à l'absence de brûlis et à l'évitement de la déforestation) (Chevallier et al., 2020). Il est donc primordial de sensibiliser les agriculteurs et les éleveurs aux avantages environnementaux liés à l'adoption de pâturages améliorés.

Afin de faciliter la transition vers ces pratiques plus durables, il est conseillé de fournir un accompagnement technique aux agriculteurs, notamment des formations sur la gestion des pâturages,

les pratiques d'ensemencement, l'utilisation des intrants comme les engrais biologiques et les soins adaptés aux différentes espèces végétales utilisées ; et un apport aux capacités d'investissement surtout pour les petits paysans. Par ailleurs, des incitations financières issues de marchés plus règlementés carbone pourraient être mises en place pour encourager davantage d'agriculteurs à adopter des pâturages améliorés, ce qui compenserait les coûts initiaux liés à cette transition (exportation avec un système de traçabilité transparent / labélisation de système durable pour éviter toute forme d'inclusion de bovins issus de système non durable) et pouvant être soutenus par des marchés carbones (additifs).

De ce fait, la remise en état des pâturages dégradées grâce à des pratiques de gestion du pâturage durables par la diminution de la pression plus particulièrement les feux de pâturage et l'adoption des techniques de gestion durable des terres par les fourrages améliorés peuvent permettre d'emprisonner de plus grandes quantités de carbone dans le sol et la biomasse, par unité de production et d'accroître les revenus des éleveurs en augmentant la productivité du bétail.

Sur le système pâturage, il est recommandé d'avoir un « Baseline » clair pour appliquer l'étude. Des études claires sur les statistiques sont proposées pour éviter l'expérience du passé avec une comptabilité unique venant d'un projet qui n'a pas de continuité et pour une réflexion sur un système plus soutenu dans le futur. La suggestion est donc la création des systèmes qui permettraient de lier les informations enregistrées systématiquement au niveau du Fokontany et au niveau des vétérinaires (comme le cas de Boeny et Menabe) à la DRAE pour que les données soient régulièrement disponibles même sans le projet et les statistiques permettraient d'améliorer les actions dans le temps. Cependant, ce système ne répond pas à la question de transhumance c'est-à-dire le flux issu de la transhumance qui est inter-régional. En conséquence, il faut aussi avoir un système qui réfléchisse sur le facteur de transhumance et de lier ces deux études à une troisième qui est la réflexion sur la surface utile pour savoir combien de surface est utilisée pour un nombre de cheptels dans une zone déterminée.

Par la suite, une des solutions par rapport aux cultures fourragères est aussi sur la notion du système en général par le fait de sédentariser une partie de troupeau pour lutter contre l'insécurité et le vol et pour bien maitriser l'alimentation et l'apport des intrants sur la culture fourragère. Mais la recommandation reste d'avoir des données de base pour que cela devient plus concrète. De plus, pour l'élevage de zébu, la sédentarisation influence les pâturages utilisés sur les poids carcasses et la situation d'embonpoint de zébu. En d'autres termes, la race traditionnelle est plutôt adaptée par des pâturages traditionnelles rustiques, et les races améliorés ou semi-améliorés sur le cas de Boeny permettraient d'augmenter à la fois l'impact de culture fourragère mais aussi l'impact sur le revenu de la carcasse qui va être importante lors de la vente.

Enfin, une étude sur les analyses des systèmes d'exploitation dans le sens de la mise en place de plan d'action pour les orientations sur le cadre politique et stratégique doit être ciblée par rapport aux acteurs comme les ministères et les paysans pour développer le système pâturage.

6.2 Recommandations sur la teneur en éléments principaux dans le sol du système de pâturage

6.2.1 Azote totale du sol

Compte tenu de la similarité de quantité d'azote dans ces deux types de pâturage, la valorisation de la symbiose entre la plante (légumineuses) et des bactéries fixatrices d'azote de l'air (rhizobium) peut permettre d'apporter de l'azote pour la nutrition de la plante (Lambers et a*l.*, 2006 ; Miller et Cramer, 2005 in Rahantalalao, 2019). L'association de pâturage avec des légumineuses de type *Stylosanthes sp*

à long terme est donc nécessaire si l'objectif principal est d'apporter de l'azote au sol (Razanamparany *et al.*, 2005). Le *Stylosanthes* est capable de fixer de grandes quantités d'azote et améliore rapidement le sol, d'autant plus que son système racinaire assez puissant permet d'en améliorer aussi la structure (Housson et al, 2008b).

Puisque l'espèce *Brachiaria sp.* n'est pas une légumineuse, c'est une graminée qui a une capacité à mobiliser la fertilité en entrainant l'extraction des nutriments par leur système racinaire (ADNANI, 2007). Elle fixe de l'azote dans leur rhizosphère et sa capacité à former une association avec des bactéries libres fixatrices d'azote lui permet de fixer jusqu'à 50 kg N/ha/an. Les graminées, par leur système radiculaire, utilisent les nitrates du sous-sol et les remontent en surface sous forme de matière organique, alors que pour les légumineuses il s'agit surtout d'un processus de fixation symbiotique (Morel et Quantin, 1964). L'association avec une légumineuse (comme l'*Acacia sp.*) permet également un meilleur développement du *Brachiaria* qui profite de la fixation d'azote par l'arbre (Husson et al., 2008) et diversifie les types de fourrages pour avoir une alimentation équilibrée des zébus en énergie et en matières azotés dans le système pâturage (FAO, 2022).

Cependant, pour une mise en application de cette recommandation, il serait approprié d'élargir sur les recherches permettant d'évaluer les espèces fourragères introduites et leur interaction individuelle avec le sol en termes d'apport en azote. Une étude comparative entre les différentes espèces végétales, en mettant l'accent sur leurs effets à long terme sur les niveaux d'azote dans le sol, pourrait fournir des informations cruciales pour orienter les choix de végétation et de gestion.

6.2.2 Phosphore du sol

L'introduction des espèces de *Brachiaria sp.* et *Stylosanthes* sp. dans les pâturages n'a pas produit de résultats significatifs en termes d'amélioration de la concentration en phosphore du sol. Il est toutefois important de souligner que ces espèces pourraient encore offrir d'autres avantages potentiels pour la qualité du sol. Il serait bénéfique d'explorer plus en détail ces avantages, tels que leur impact sur la structure du sol, la fixation d'azote ou l'amélioration de la matière organique.

Si l'objectif est d'augmenter spécifiquement les teneurs en phosphore dans le sol, une approche prometteuse serait d'envisager des associations entre les espèces mentionnées et des arbres comme *Acacacia sp* qui pourraient potentiellement créer des interactions symbiotiques favorables et par la suite contribueraient à améliorer la concentration en phosphore du sol. Il serait donc judicieux d'explorer ces combinaisons d'espèces pour déterminer leur effet sur les niveaux de phosphore et d'autres aspects de la fertilité du sol. En effet, les légumineuses ligneuses recyclent beaucoup mieux les éléments nutritifs du sol (N, P, K, Ca et Mg), grâce à un enracinement beaucoup plus profond que celui des graminées (Klein et César, 1999).

Dans l'ensemble, les résultats actuels démontrent que bien que certaines espèces végétales n'aient pas conduit à des améliorations significatives de la concentration en phosphore, il existe encore des opportunités pour maximiser les avantages des associations végétales en termes de gestion du sol. Une approche équilibrée et axée sur la compréhension des interactions complexes entre les plantes et les sols permettra d'optimiser les performances des pâturages en termes de santé du sol et de production durable.

6.2.3 Potassium du sol

À la lumière des conclusions tirées de cette étude, plusieurs recommandations clés émergent pour guider la gestion et l'amélioration des sols dans la région étudiée. Tout d'abord, compte tenu de la nette supériorité de la concentration en potassium dans les pâturages améliorés par rapport aux pâturages traditionnels, il est donc recommandé de promouvoir l'introduction de ces espèces végétales. Cette initiative pourrait potentiellement contribuer à un enrichissement graduel en potassium et favoriser un apport régulier de potassium dans les couches superficielles du sol, renforçant ainsi la fertilité à long terme.

Cependant, pour une mise en œuvre efficace de cette recommandation, il serait pertinent d'entreprendre des recherches pour évaluer en détail les espèces végétales introduites et leur interaction individuelle avec le sol en termes d'absorption et de relargage de potassium.

De plus, il serait bénéfique de mener des recherches visant à déterminer les facteurs environnementaux spécifiques qui influencent l'efficacité de l'absorption de potassium par les espèces végétales. Une meilleure compréhension de ces facteurs, tels que le pH du sol, la disponibilité en eau et d'autres paramètres clés, permettrait d'affiner les recommandations de gestion et de fournir des lignes directrices plus précises pour maximiser l'enrichissement en potassium.

7 CONCLUSION

Le réchauffement climatique présent et futur est un enjeu politique mondial et touche également le système de pâturage à Madagascar. Ce système court un risque de pénurie de fourrage pour les éleveurs de bovins dans la région de Boeny. Les principaux facteurs, outre le climat, qui pourraient influer sur les risques actuels et futurs liés au climat, sont les dégradations des pâturages dues au feu de pâturage. Face à l'arrivée des migrants qui ignorent les techniques de gestion des terres, cette pratique devient de plus en plus prononcée et risque à long terme une forte dégradation de pâturage indigène. Pourtant, l'élevage bovin est généralement associé à des surfaces en fourrage qui constituent un potentiel de stockage de carbone dans le sol. Les sols sous pâturages traditionnels présentent une masse de carbone significativement inférieure par rapport aux sols sous pâturages améliorés. Ce dernier est associé au système et intervient ainsi comme un phénomène de compensation aux émissions de GES qui rend le bilan carbone positif.

Vue la situation actuelle sur l'état de dégradation des ressources naturelles, la réduction des émissions de gaz à effet de serre s'inscrit de plus en plus dans les politiques publiques à Madagascar. L'élevage bovin doit pour cela faire le bilan de son impact sur l'environnement en matière d'émissions de gaz à effet de serre. L'action à envisager est donc de diminuer le niveau des émissions de gaz à effet de serre et de favoriser le transfert et le stockage de carbone dans des compartiments terrestres sous une forme stabilisée. À ce titre, les augmentations des surfaces de culture fourragère apparaissent comme des stockages de carbone potentiels très importants, d'après les scénarios proposés. En effet, une augmentation de 2% à 10% par an de surface de culture fourragères mène à une compensation respective de 26,03 à 46,77 t $CO_{2éq}$ /ha par an jusqu'en 2030.

Pour la teneur en éléments minéraux du sol, le taux d'azote totale et de phosphore du sol sous pâturages traditionnels et améliorés sont identiques et comparables à d'autres études antérieures. Cependant, les pâturages améliorés enrichissent le sol en azote à long terme. Pourtant, le taux de potassium est

significativement différent entre ces deux types de pâturage avec des taux supérieurs par rapport à d'autres études et cette différence est justifiée par la présence de l'espèce introduite dont *Stylosanthes sp*., à faible pouvoir d'absorption de potassium.

En somme, la condition préalable à la prévention de la dégradation des pâturages est l'application d'une bonne gestion de l'occupation des sols. Dans ce contexte, il a été démontré que les espèces fourragères bien adaptées au climat et au sol, principalement les espèces fourragères *Brachiaria sp* et *Stylosanthes sp*, ont un fort potentiel de prévention de la dégradation des terres et même de récupération. De plus, la gestion des feux dans les pâturages fait appel au changement des régimes de brûlage pour modifier les réserves de carbone dans le paysage. La réduction de la fréquence ou la prévention des feux tendent à augmenter la biomasse moyenne des sols, ainsi que la densité des espèces locales. Il est également essentiel de poursuivre la recherche dans ce domaine afin de mieux comprendre les mécanismes de séquestration du carbone dans les sols et l'apport que le système pâturage peut apporter sur les revenus du paysan. En connaissant ces mécanismes, il est possible d'optimiser les pratiques agricoles pour une séquestration plus efficace du carbone et de maximiser l'enrichissement en éléments minéraux du sol. De ce fait, il est recommandé d'allouer des ressources supplémentaires à la recherche et au développement de nouvelles approches comme l'adoption d'autres système dont la sédentarisation des races améliorées de zébu pour maximiser les bénéfices environnementaux et agricoles de ces pâturages améliorés.

REFERENCES

1. ADNANI Mouhamadi, 2007, *Les principes et les techniques de base du semis direct sur couverture végétale permanente (SCV)*. Mémoire pour l'obtention du diplôme de Licence en sciences, Option : Agriculture. 63p.
2. Agbenin J.O. et Anumonye M., 2006, *Distribution and Sorption of Phosphate in a Savanna Soil Under Improved Pastures in Northern Nigeria*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37p: 493–511.
3. Andriamasy H.L., 2015, *Relation entre les caractéristiques pédologiques des sols ferrallitiques de Madagascar et leurs propriétés d'échange*. Mémoire de Master en Sciences et Technologie. Faculte des Sciences, Université d'Antananarivo. 102p.
4. Bigot S. et al, 2018, *La difficulté du monitoring climatique à une échelle fine dans une région fortement impactée par la déforestation tropicale : la forêt sèche du parc national d'Ankarafantsika (Madagascar)*. Conference: 31ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie At: Nice. Volume : 31. 7p.
5. Burnod P. et al, 2021, *Diagnostics socio-fonciers des espaces de pâturages dans le Boeny (synthèse)*. Programme de Protection et Réhabilitation des sols pour améliorer la sécurité alimentaire (ProSol), Programme de promotion d'une Politique Foncière Responsable (ProPFR). 27p.
6. Chevallier T., Razafimbelo T.M., Chapuis-Lardy L. et Brossard M., 2020, *Carbone des sols en Afrique : Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles*. IRD Éditions. Rome, Marseille. Lambert-Derkimba A., Daniels M., Burger P.
7. Christoph G. et al, 2020, *Climate Risk Profile: Madagascar.* Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). 12p.
8. Desjardins Th., Lavelle P., Barros E., Brossard M., Chapuis-Lardy L., Chauvel A., Grimaldi M., Guimarães F., Martins P., Mitja D., Müller M., Sarrazin M., Tavares Filho J. et Topall O., 2000, *Dégradation des pâturages amazoniens. Description d'un syndrome et de ses déterminants*. Étude et Gestion des Sols, 7, 4, numéro spécial. p353-378.
9. Dolle J. B., Philippe F., Jacques A., Daniel S. et Katja K., 2013, *Contribution de l'élevage bovin aux émissions de GES et au stockage de carbone selon les systèmes de production.* Fourrages, 215, pp.181 – 191.
10. DOLLE J.B., GAC A. et LE GALL A., 2009, *L'empreinte carbone du lait et de la viande bovine.* Institut de l'élevage. P233-236.
11. Duchaufour Ph., 1991, *Sol, végétation, environnement, Pédologie*, 3ème ed. 289 p.
12. FAO, 2022, *Production du Brachiaria et du stylosanthes.* Yaounde. https://doi.org/10.4060/cc1933fr.
13. GBENOU G. X. et al, 2022, *Emission de méthane entérique en saison sèche froide chez les zébus peulh soudaniens en Afrique de l'ouest.* p 275-278.
14. GIEC, 2002, *Les changements climatiques et la biodiversité*. Document technique V du GIEC. 89p.
15. GIEC, 2003, *Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie*. Programme du GIEC des inventaires nationaux de gaz à effet de serre. 594 p.
16. GIEC, 2006, *Annexe 2. Résumé des équations*. Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres. 37p.

17. GIZ et EURAC, 2017, *Guide complémentaire sur la vulnérabilité : le concept de risque. Lignes directrices sur l'utilisation de l'approche du Guide de référence sur la vulnérabilité en intégrant le nouveau concept de risque climatique de l'AR5 du GIEC*. Bonn : GIZ. 68p.
18. Grinand C., Maire G.L., Vieilledent G., Razakamanarivo H., Razafimbelo T. et Bernoux M., 2017, *Estimating temporal changes in soil carbon stocks at ecoregional scale in Madagascar using remote-sensing*. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation, 54p : 1-14.
19. Grinand C., Rajaonarivo A., Bernoux M., Pajot V., Brossard M., Razafimbelo T., Albrecht A. et Le Martret H., 2009, *Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar*. Etude et Gestion des Sols, 16p : 23-33.
20. Grouzis M., Leprun J-C. et Randriambanona H., 2003, *Propriétés physico-chimiques du sol et successions post-culturales dans la région d'Analabo (forêt Mikea).* Mem. Acad. Natl. Art. Lett. Sci, 49 : p77-88.
21. Husson O., Charpentier H., Razanamparany C., Moussa N., Michellon R., Naudin K., Razafintsalama H., Rakotoarinivo C., Rakotondramanana et Séguy L., 2008a, *Manuel pratique du semis direct à Madagascar Brachiaria sp. : B. ruziziensis, B. brizantha, B. decumbens, B. humidicola*. GSDM/CIRAD. Madagascar. Husson. 20p.
22. Husson O., Raymond B., Rakotondramanana et Séguy L., 2008b, *Le semis direct sur couverture végétale permanente (SCV). Comment ça marche ?* Collection EDITECH. 56p.
23. Institut International de la Potasse, 1974, *Le potassium dans les cultures et les sols tropicaux*. In : Dixième colloque de l'Institut international de la potasse, Abidjan, Côte d'Ivoire, décembre 1973. Berne, Suisse, Institut international de la potasse, 603 p.
24. Kauffman J. B. and Donato D. C., 2012, *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests*. CIFOR. Bogor, Indonésia: Working Paper 86, 50p.
25. Klein H.D. et César J., 1999, *Fodder crops and maintining sol fertility*. In : Cultures fourragères tropicales. Roberge G. (ed.), Toutain B. (ed.). Montpellier : CIRAD, p321-357.
26. LANDDEV, 2022, *Projet d'appui pour l'évaluation des pertes en terres et du ruissellement lies aux pratiques des feux dans la région Boeny et ses implications dans les cadres politiques de gestion des paysages*. Rapport de projet par Laboratoire terres paysages et développement (LLANDDEV), Département des eaux et forêts, École supérieure des sciences agronomiques (ESSA-FORETS). 154p.
27. METEO et CLIMAT, 2023, *https://planificateur.a-contresens.net/afrique/madagascar/boeny-region/7670849.html* (consulté le 20 juillet 2023).
28. MinEL, 2015, *Lettre de Politique de l'Elevage*. Ministère de l'Elevage ; Madagascar. 23p.
29. Morel R. et Quantin P., 1964, *Les jachères et la régénération du sol en climat soudano-guinéen d'Afrique Centrale*. L'Agronomie tropicale. Extrait du n°2. p105-136.
30. Nelson D.W. and Sommers L.E., 1996, *Total carbon, organic carbon, and organic matter. In Sparks, D.L., et al., Eds., Methods of Soil Analysis*. Part 3, SSSA Book Series, Madison, p961-1010.
31. ONE, DGF/MEF, CI, FTM et MNP, 2011, *Evolution de la couverture de forêt naturelles à Madagascar 2005-2010*.
32. Rahantalalao R.S.H.R., 2019. *Déterminants physico-chimiques de la phytodisponibilité du phosphore dans les sols malgaches*. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. Université d'Antananarivo. 186p.
33. Raharimalala N.D., 2013, *Evaluation des stocks de carbone et de phosphore total dans différents types de sols à Madagascar*. Mémoire de DEA. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo. 93p.

34. Rakotomampionona N.A.A., 2013, *Évaluation des stocks de carbone et d'azote du sol sous des pratiques agro-écologiques et conventionnelles dans le Moyen Ouest du Vakinankaratra*. Mémoire d'Ingéniorat en Sciences Agronomiques. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo.
35. Ramaroson H.V., 2017, *La spectrométrie infrarouge comme outil de caractérisation des constituants et des propriétés physicochimiques des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar*. Thèse. Institut national d'études supérieures agronomiques de Montpellier (Montpellier SupAgro). 194p.
36. Ratsimandresiarivo M.D., 2019, *Cartographie numérique de la distribution des différents types de sols de la région de BOENY.* Mémoire d'Ingéniorat en Sciences Agronomiques. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo.115p.
37. Razafimbelo T., Albrecht A., Ravelojaona H., Moussa N., Razanaparany C., Rakotoarinivo C., Razafintsalama H., Michellon R., Naudin K., Rabeharisoa L. et Feller C., 2008, *Stockage de carbone dans le sol sous-système en semis direct sous couvert végétal suivant différents contextes pédoclimatiques. Cas du Sud-Est, du Centre-Nord et du Sud-ouest de Madagascar, Terres Malgaches spécial actes du séminaire « sols tropicaux et semis direct sous couvertures végétales »*. Université d'Antananarivo
38. Razafimbelo T.M., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Bourgeon G., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Oliver R., Razanamparany C., Seguy L. et Swarc M., 2006, *Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar*. Etude et Gestion des Sols, 13(2)p : 113-127.
39. Razafinarivo T. D., 2018, *Elaboration d'une méthode de suivi et de gestion des ressources pastorales par une approche combinée de modélisation et de télédétection*. Thèse doctorat en Sciences Agronomiques. Zootechnie et santé animale. Ecole doctorale A2E (Agriculture – Elevage – Environnement). Ecole supérieure des sciences agronomiques. 155p.
40. Razanamparany C., Husson O. et Rakotondramanana, *2005, Propositions d'essais pour la mise en place et la gestion des plantes de couvertures dans les plantations d'anacardiers de VERAMA, Masiloka.* CIRAD, GSDM, TAFA. Madagascar. 7p.
41. Sajimin, Purwantari ND et Sugoro I., 2016, *Contribution of Legumes on Phosphoric Absorption by Panicum maximum cv Riversdale in Intercropping System*. Indonesian Research Institue of Animal Production, 21(3) : p151-158.
42. SOLTNER D., 2011, *Les bases de la production végétale. Tome 2 : le climat, météorologie, pédologie, conservation des sols, bioclimatologie, agronomie carbone.* 352p.
43. Stephanie Gleixner (PIK), Sophia Lüttringhaus (HFFA), Juliane Kaufmann (HFFA), Patrick Smytzek (GIZ) et Christoph Gornott (PIK), 2022, *Evaluation des facteurs d'impact climatique à Madagascar. Région cible* : Boeny. 9p.
44. Timm T. et Andreas W., 2008, La finance carbone dans les parcours pastoraux. Une évaluation du potentiel dans les parcours collectifs. World Agroforestry Centre, Kunming, Chine.
45. Vendrame P.R., Brito O.R., Guimarães M.F., Martins É.S. et Becquer T., 2010, *Fertility and acidity status of latossolos (oxisols) under pasture in the Brazilian Cerrado.* An. Acad. Bras. Ciênc, 82p: 1085-1094.

ANNEXES

Annexe 1: Note d'adaptation relative au développement de la chaîne d'impact selon le concept de l'AR5 du GIEC (Module 2)

Etape 1 : Identifier les impacts et les risques climatiques

Quels sont les principaux impacts et les principaux risques climatiques qui affectent le système pâturage ?

Les principaux impacts et les principaux risques climatiques qui affectent le système pâturage sont :
Sur l'accès aux ressources naturelles, il y a le **risque de dessèchement de savane indigène.**
Sur l'élevage bovin, on constate le **risque de manque d'alimentation pour les bétails.**
Sur la culture fourragère, il existe un **risque de diminution de production de fourrages améliorées.**

De quelle façon les phénomènes météorologiques et les évènements climatiques extrêmes ont-ils impacté votre système par le passé ? Avez-vous constaté de nouvelles évolutions ou de nouveaux évènements (par ex. les dix dernières années) ?

Il y a une constatation de nouvelles évolutions ou de nouveaux évènements les dix dernières années comme :
Sur l'accès aux ressources naturelles, la perte de savane indigène apprécié par les zébus avec l'augmentation des herbes traditionnelles indésirables avec des épines comme les *Heteropogon contortus* ou « danga » et la dégradation des terres (causé par les feux de pâturage) causant l'érosion persistent.
Sur l'élevage bovin, la manque de fourrage pour les zébus et la manque d'eau pour les bétails peuvent être constater.

Quels impacts socio-économiques avez-vous pu constater comme conséquence de ces évènements climatiques ?

Les impacts socio-économiques constatés comme conséquence de ces évènements climatiques sont la perte de rendements en savane indigène et culture fourragère et l'augmentation de fatigue et maladies de bétails.

Quels sont les enjeux qui affectent le plus le système pâturage ?

Ce sont surtout la rareté de l'eau, la dégradation de pâturage et la sous-alimentation des bétails.

Quels autres facteurs ont-ils une influence sur l'impact ou les risques ? S'agit-il de facteurs climatiques dominants ?

Ce sont surtout la dégradation des forêts, l'exploitation des savanes et les feux de pâturage qui ne s'agissent pas de facteurs climatiques dominants.

LIBELLE FINAL DU RISQUE : Risque de pénurie de fourrage pour les éleveurs de bovins.

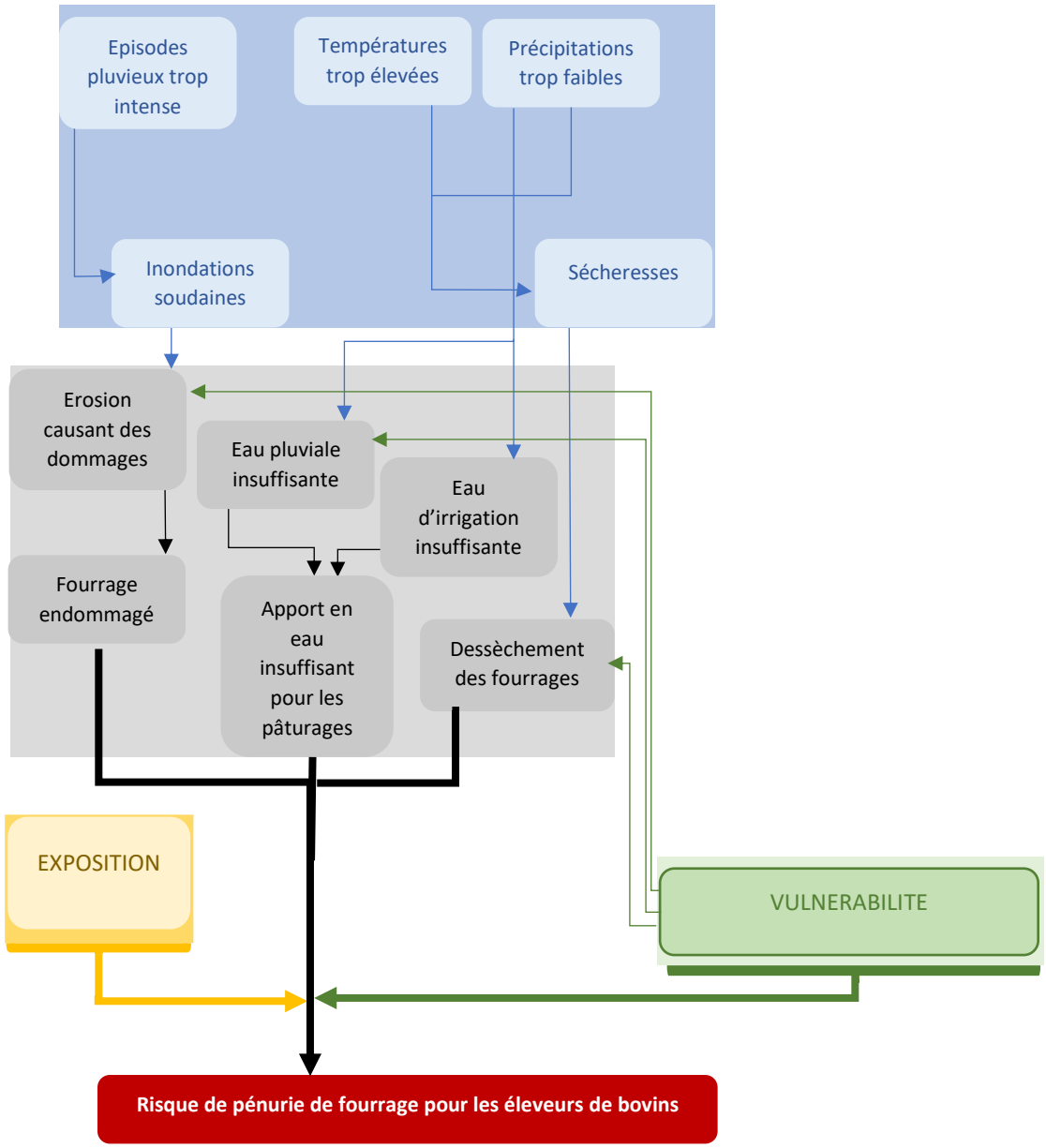
Etape 2 : Déterminer le danger et les impacts immédiats

Quels sont les tendances ou phénomènes dangereux liés au climat et leurs impacts physiques qui posent un risque pour le système pâturage ? (cf. encadré bleu clair)

Les signaux climatiques sont les **épisodes pluvieux trop intenses,** les **températures trop élevées** et les **précipitations trop faibles**. Les impacts physiques directs sont les **inondations soudaines** et les **sècheresses**.

Quels impacts intermédiaires relient le danger et le risque ? (cf. encadré gris)

Les impacts intermédiaires sont **l'érosion qui endommagent les fourrages ; l'eau d'irrigation et pluviale insuffisantes pour les pâturages** et **le dessèchement des fourrages.**



Facteurs de danger et facteurs d'impact intermédiaire pour le risque « de pénurie de fourrage pour les éleveurs de bovins »

Etape 3 : Déterminer la vulnérabilité

Sensibilité : **Quelles sont les caractéristiques qui rendent le système vulnérable aux impacts négatifs potentiels du ou des dangers considérés ?** (Encadré vert contour vert)

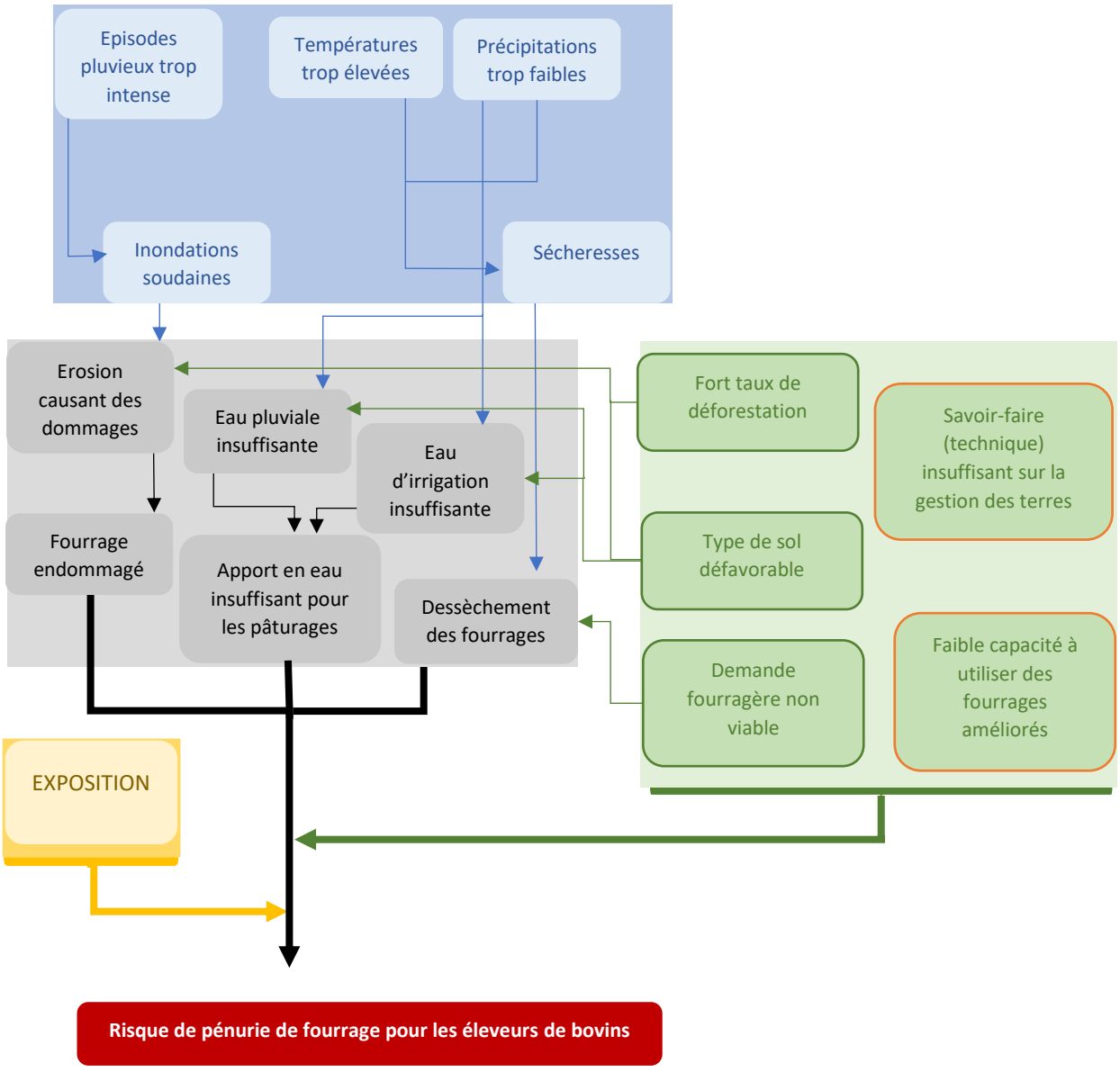
Ce sont surtout le fort taux de déforestation, le type de sol défavorable et la demande fourragère non viable.

Capacité : **Quelles sont les capacités existantes ou manquantes du système sociétal permettant de réduire le risque en question- aujourd'hui et dans le futur ?** (cf. encadré vert contour orange)**. Cela tient compte des dimensions suivantes :**

Connaissances : existe-t-il ou manque-t-il des connaissances ou une expertise qui pourraient faciliter l'adaptation ?

Le savoir-faire (technique) est insuffisant sur la gestion des terres.

Technologie : existe-t-il ou manque-t-il des solutions techniques qui permettraient d'accroître la capacité ?

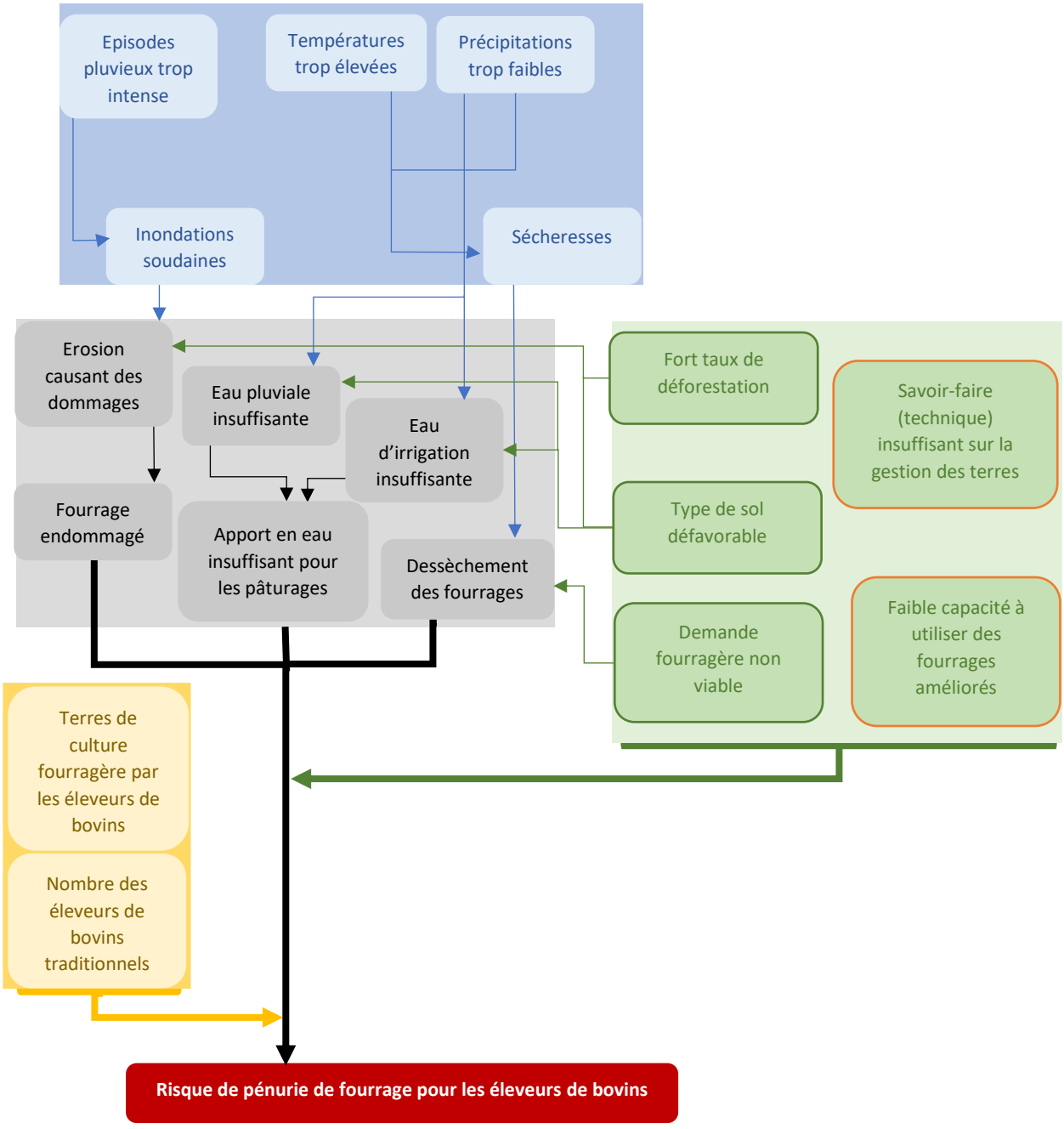


Facteurs de sensibilité (contour vert) et de capacité (contour orange) pour le risque « de pénurie de fourrage pour les éleveurs de bovins »

Etape 4 : Déterminer l'exposition

Quels facteurs déterminent l'exposition ? (encadré jaune)

Les facteurs appropriés pour le système pâturage sont les **terres de culture fourragère par les éleveurs de bovins** et le **nombre des éleveurs de bovins traditionnels**. Plus le nombre des éleveurs de bovins ne cultive pas des fourrages, plus le risque est élevé.

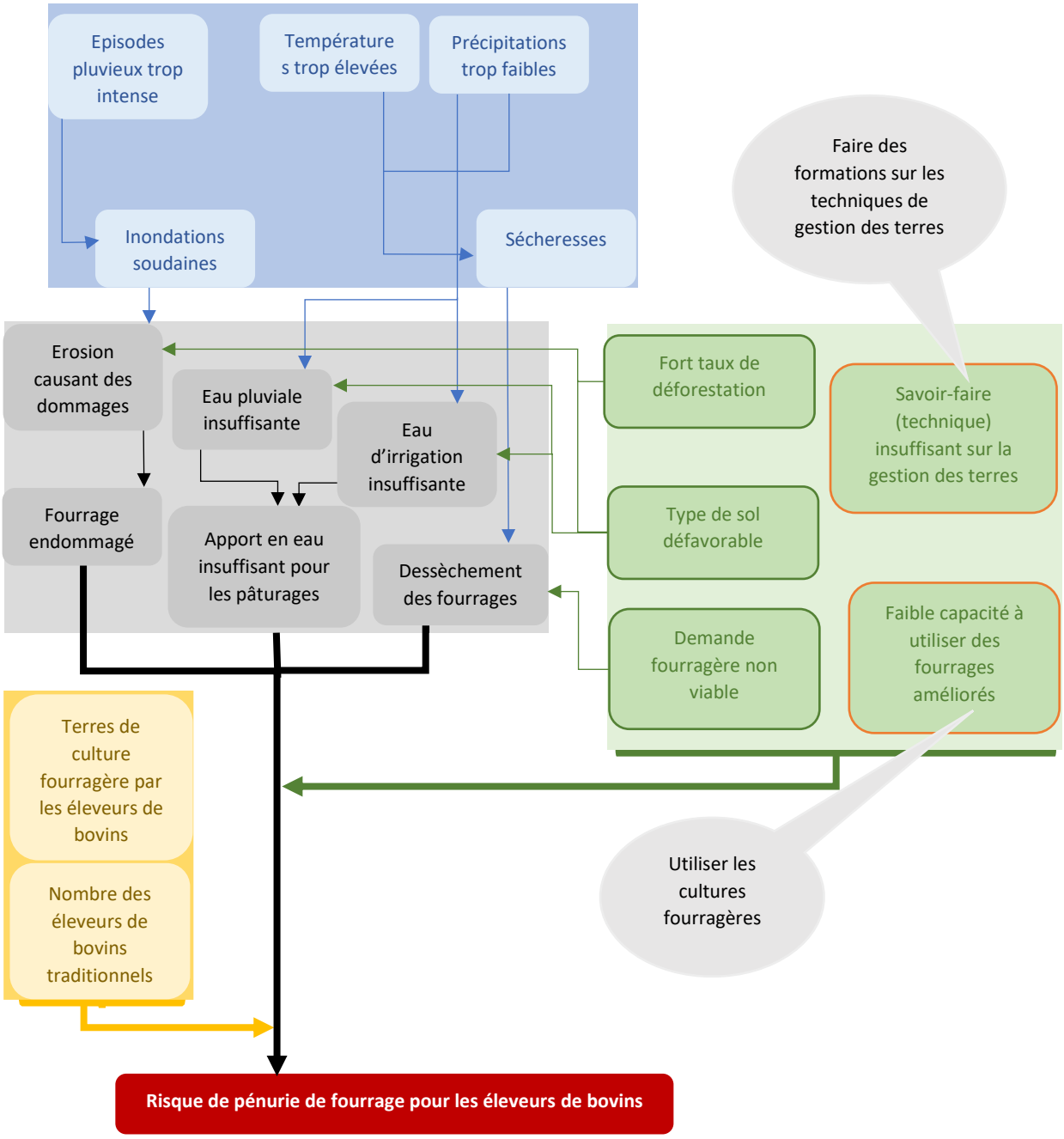


Facteurs exposition pour le risque « de pénurie de fourrage pour les éleveurs de bovins »

Etape 5 : Conduire une réflexion collective sur les mesures d'adaptation (optionnel)

Quelles mesures pourraient contribuer à réduire la vulnérabilité et/ou l'exposition au sein du système pâturage ? (bulle gris)

L'analyse de vulnérabilité est le point de départ du lancement de mesures d'adaptation, et peut servir d'outil utile de confrontation avec la réalité. Cette chaine d'impact a comme mesures d'adaptation de **former les éleveurs sur les techniques de gestion des terres** et **à utiliser les cultures fourragères**.



Mesure d'adaptation pour le risque « de pénurie de fourrage pour les éleveurs de bovins »

Annexe 2 : Guide d'entretien "Acteurs ressources"

(*** Veuillez cocher les informations exactes et remplissez les pointillés si nécessaire)

I. IDENTIFICATION DE L'ENQUETE(E) ET INFORMATIONS SUR LE VILLAGE

Date : ……/……/……. **Commune** : ……

ID ménage : …….. **Fokontany** : ……..

Enquêteur : …… **Hameau** : ……..

Voulez-vous participer à cette enquête ? ☐ Oui ☐ Non

Si Non, demandez et notez la/les raisons du refus……

Si Oui, veuillez passer à la section suivante.

• **Enquêté (e) :** …… • **Sexe :** ☐ Homme ☐ Femme • **Chef.fe de ménage** : ☐ OUI ☐ NON *Si OUI : voir section 1.2* • Si NON, **Qui est le chef.fe ?** ☐ Epoux /épouse du répondant ☐ Père du répondant ☐ Mère du répondant ☐ Fils du répondant ☐ Autre (spécifier) …… • **Votre âge approximatif**, en quelle année êtes-vous né.e (veuillez choisir parmi les tranches d'âge suivantes - Si, par exemple, l'âge est de 27 ans, la sélection sera 25-34 ans) : ☐ 0-14 ☐ 15-24 ☐ 25-34 ☐ 35-44 ☐ 45-54 ☐ 55-64 ☐ Plus de 64 • **Situation matrimoniale :** ☐ Célibataire ☐ Marié.e ☐ En couple ☐ Veuf.ve ☐ Divorcé.e ☐ Père / Mère célibataire	• **Niveau d'instruction :** ☐ Non scolarisé.e ☐ Primaire (EPP) ☐ Secondaire (CEG) ☐ Lycée ☐ Supérieur / Université ☐ Formation professionnelle • **Tel :** …… • **Groupe ethnique :** ……

II. EVOLUTION DES PARCELLES PATURAGES EXPLOITEES

Dans le cadre de ses activités de subsistance, quelles sont les principales ressources exploitées ou accédées par le ménage et combien de parcelles avez-vous exploitées pour chaque catégorie (toerana firy ?) :

Parcelles	Année-4	Année-3	Année-2	Année-1	Année en cours
Pâturages					

	Options de réponse	Terrains			
		1	2	3	4
ID_Parcelle					
Localisation (code du terrain à mettre sur carte)					
Surface estimée (ha)					
Distance par rapport à l'habitation	☐ 0-2 km (0 – 30 mn de marche) ☐ 2-5 km (30mn – 1h) ☐ 5-10 km (1h – 2h) ☐ 10-20 km (2h – 4h) ☐ Plus de 20 km (plus de 4h)				
Quels droits le ménage détient sur le pâturage :	☐ Propriétaire (pâturage privé), ☐ Codétenteur de droit en indivision (pâturage communautaire, familial, lignager) ☐ Droit de passage temporaire ☐ Droit secondaire (droit de parenté par mariage) ☐ Autres …….				
Autres utilisateurs si droits communautaires	☐ Collectifs : fratries (entre frères et sœurs) ☐ Lignage (personnes descendantes d'un ancêtre commun) ☐ Fokonolona ☐ Autres ……..				
Mode d'acquisition/ d'accès	☐ Achat ☐ Héritage (famille ou belle – famille) ☐ Donation particulier - particulier ☐ Donation Etat – particulier ☐ Droit coutumier (validation sociale) ☐ Défrichement/ brûlis/ mise en valeur				

	☐ Terrain communautaire ☐ Autres				
Année d'acquisition ou d'utilisation	☐ Moins de 5 ans ☐ Entre 5 et 10 ans ☐ Entre 10 et 20 ans ☐ Plus de 20 ans				
Dans quelles catégories de terres se trouvent vos pâturages ?	☐ Terres appartenant au PN ☐ Terres communales ☐ Terres appartenant au chef de ménage ☐ Autres				
Pourquoi avoir choisi l'emplacement actuel ?	☐ Règlementation ☐ Autorisation d'un tier personne ☐ Décision personnelle sans contrainte ☐ Disponibilité des ressources propices pour le pâturage ☐ Autres.....				
Le ménage et/ou les codétenteurs de droits ont – ils le droit d'exclure des propriétaires de zébus tiers ?	☐ Oui ☐ Non				
Le ménage et/ou les codétenteurs de droits peuvent – ils transférer les droits (succession, don, vente, …) sur le pâturage à un tiers ?	☐ Oui. ☐ Non				
Le ménage et/ou les codétenteurs de droits se sentent – ils en sécurité par	(a) Rapport à leurs droits ? ☐ Oui ☐ Non (b) Vis-à-vis de tiers ? ☐ Oui ☐ Non (c) Vis-à-vis de l'Etat ? ☐ Oui ☐ Non (d) Vis-à-vis du PN ? ☐ Oui ☐ Non (e) Vis-à-vis des agriculteurs ?				

	☐ Oui ☐ Non				
Quelles menaces à court ou moyen terme sont perçues par le ménage ?	☐ Disparition des plantes propices pour le pâturage ☐ Exclusion par le propriétaire du terrain ☐ Exclusion par l'Etat ☐ Exclusion par le PN ☐ Autres …… ……				
Le terrain est – il sujet à conflit (maintenant ou dans le passé) ?	☐ Oui ☐ Non. Si Oui, préciser si : ☐ Conflit intrafamilial, interfamilial, ☐ Avec les voisins ou membres de la communauté, ☐ Avec le MNP ☐ Avec les structures de l'Etat				
Quelles étaient les raisons des récents conflits que vous avez eus avec l'agent forestier ou autres autorités ?	☐ Occupation illégale ☐ Non-paiement de la taxe de culture ou de pâturage ☐ Chevauchement de la limite des parcelles ☐ Frais et coûts imposés soudainement ☐ Autres paiements /coûts imposés …… …… ☐ Autres raisons …… …… ☐ Refus de répondre				
Comment les conflits ont-ils été résolus par la suite ?	☐ Non résolus à ce jour ☐ Règlement à l'amiable sans amende d'infraction par l'agent forestier ☐ Paiement d'une redevance de culture ou de pâturage et d'une amende d'infraction ☐ Paiement de l'indemnité devant les agents de la force publique ☐ Peine privative de liberté de courte durée plus amende pour infraction ☐ Emprisonnement de longue durée ☐ Autres …… ……				

	☐ Refuse de répondre				
Si le conflit n'a pas été résolu à ce jour, quels ont été les obstacles de sa non-résolution ?	<u>Noter quelques raisons :</u> …… ……				
Au cours des deux dernières années, combien de fois en moyenne vous êtes ou un proche parent est entré en conflit avec un producteur voisin (agriculteurs ou éleveurs) ?	☐ Moins de 2 fois ☐ 2 à 5 fois ☐ 6 à 10 fois ☐ 10 à 20 fois ☐ Plus de 20 fois ☐ Autres indications …… …….. ☐ Refus de répondre				
Quelles étaient les raisons du conflit ?	☐ Différend concernant les droits de propriété/occupation du terrain ☐ Différend sur les limites et frontières des parcelles ☐ Différend concernant les dégâts causés par le bétail sur les cultures ☐ Différend concernant l'installation de champs sur les couloirs à bétail ☐ Autres raisons …….. …….. ☐ Refus de répondre				
A qui étiez-vous opposé (parties en conflit) ?	☐ Agriculteurs du même village ☐ Eleveurs du même village ☐ Agriculteurs d'autres villages de la même commune ☐ Agriculteurs d'autres communes ☐ Eleveurs transhumants ☐ Autres …….. …….. ☐ Refus de répondre				
Comment le conflit a-t-il finalement été résolu ?	☐ Non résolu à ce jour ☐ Règlement amiable sans les autorités du village ☐ Paiement de la compensation devant les autorités du village ☐ Paiement de l'indemnité devant les agents				

	de la force publique ☐ Autres ……. …….. ☐ Refuse de répondre				
Si le conflit n'a pas été résolu à ce jour, quels ont été les obstacles de sa non-résolution ?	<u>Noter quelques raisons :</u> …… ……				
Quelle est votre vision à moyen terme	☐ Sans vision précise (business as usual) ☐ Extension ☐ Sécurisation formelle ☐ Changement de vocation ☐ Morcellement ☐ Recherche de nouvelle parcelle				

III. CULTURE FOURRAGERE

Quel type de culture pratiquez-vous ? Préciser la spéculation pratiquée, la variété, les associations de culture, le type de sol. Sur quelle superficie et où? Quelles sont les opérations culturales (ex labour, semis, repiquage, sarclage, récolte, transport…) et la période de travail ? Préciser le nom, la quantité et le prix des intrants (location de terrain, semences, engrais, produits phytosanitaires, autres…). Quelle est la quantité totale de produits ? la quantité autoconsommée ? la quantité vendue ? le prix unitaire de vente ?

Informations concernant la culture fourragère réalisé sur L'ANNEE PRECEDENTE												
Système de culture	Superficie cultivée [ha]	Itinéraire technique	Intrants			Main d'œuvre			Quantité de produits			PU de vente [Ar]
			Nom	Qté	PU [Ar]	MOF [HJ]	MOE [HJ]	Salaire MOE [Ar]	Totale	Consommée/ Métayage	Vendue	

Informations concernant la culture fourragère réalisé sur L'ANNEE EN COURS												
Système de culture	Superficie cultivée [ha]	Itinéraire technique	Intrants			Main d'œuvre			Quantité de produits			PU de vente [Ar]
			Nom	Qté	PU [Ar]	MOF [HJ]	MOE [HJ]	Salaire MOE [Ar]	Totale	Consommée/ Métayage	Vendue	

Evolution des surfaces exploitées durant les cinq (5) dernières années (en ha)

Système de culture	2019	2020	2021	2022	2023

Evolution des parcelles agricoles exploitées durant les cinq (5) dernières années (nombre)

Système de culture	2019	2020	2021	2022	2023

Avez-vous déjà reçu une formation sur la Bonne Pratique Agricole (BPA) ?

☐Oui ☐Non

Si oui :

Type de culture	Quand ?	Où ?	Formateur

Avez-vous d'autres observations/remarques/suggestions sur la partie Agriculture ?

……

IV. ELEVAGE BOVIN

Quel type d'élevage pratiquez-vous ? Préciser la spéculation pratiquée, les races, le mode de parcours (enclos, gardiennage, pâturage libre…). Quelle est la taille de votre cheptel ? Préciser le nombre de têtes par type (mâle, femelle…). Quelle est l'alimentation donnée aux animaux ? Préciser le nom, la quantité et le prix des intrants (achat de cheptel, prophylaxie - vaccination, vitamine, autres…). Quelle est la quantité totale de produits ? la quantité autoconsommée ? la quantité vendue ? le prix unitaire de vente ? Préciser la périodicité de la consommation (fête, cérémonie, famadihana…) s'il y en a.

Informations concernant l'élevage réalisé sur L'ANNEE PRECEDENTE											
Système d'élevage	Taille du cheptel	Alimentation			Intrants			Quantité de produits			PU de vente [Ar]
		Nom	Qté	PU [Ar]	Nom	Qté	PU [Ar]	Totale	Consommée	Vendue	

Informations concernant l'élevage réalisé sur L'ANNEE EN COURS											
Système d'élevage	Taille du cheptel	Alimentation			Intrants			Quantité de produits			PU de vente [Ar]
		Nom	Qté	PU [Ar]	Nom	Qté	PU [Ar]	Totale	Consommée	Vendue	

Evolution de la taille du cheptel (nombre de têtes) durant les cinq (5) dernières années

Système d'élevage	2019	2020	2021	2022	2023

Avez-vous déjà reçu une formation sur la Bonne Pratique d'Elevage ?

☐Oui ☐Non

Si oui :

Type d'élevage	Quand ?	Où ?	Formateur

Avez-vous d'autres observations/remarques/suggestions sur la partie Elevage ?

……

V. CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SYSTEME PATURAGE

Avez-vous déjà entendu parler de changement climatique « fiovaovan'ny toetr'andro » ? ☐ Oui ☐ Non		
Pragmatiquement, quels sont les impacts du Changement climatique sur votre famille ?		
Sur la culture fourragère	**Sur l'élevage**	**Sur l'accès aux ressources naturelles**
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-

Quelles **stratégies, innovations, techniques** adoptez-vous face à ces problèmes de changement climatique ?

Sur la culture fourragère	Sur l'élevage	Sur l'accès aux ressources naturelles
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
	-	-

Quels **pratiques de pâturage** vous faites ?	☐ Pâturages améliorés avec des cultures fourragère o Stylosanthes o Brachiaria o Autres : …… ☐ Savanes indigènes o Hyparenia o Aristida o Autres : ……
Comment sont-elles gérées ?	☐ Technique de fauchage ☐ Technique de fanage ☐ Autres : ……
Comment évolue la production durant ces dernières années ?	☐ Baisse ☐ Hausse ☐ Stable

IDENTIFICATION DES IMPACT ET DES RISQUES

Risque	Score (Impact)	Exposition	Danger	Durée (années)	Etendue (Surface)	Fréquence
Dégradation du système de **pâturage** par les feux de brousse		Pâturage	Environnement (perte et/ou dessèchement de savane indigènes)			
			Diminution de la production des fourrages améliorés			
			Dégradation de sol			

Ravageurs			Diminution de la production des fourrages améliorés Maladie			
Migration des bétails		Bétails	Perte de bétail (fatigue, manque de pâturage, …)			

Mesures du risque (score)

1= à peine perceptible

2= faibles impacts

3= Incidences moyennes

4= Impacts élevés (peu tuer même si aucun cas de perte de vie humaine n'est encore décompté)

5= Conséquences graves (pertes de vies humaines observées)

IDENTIFICATION DES RESSOURCES AFFECTES ET SES CAUSES (VULNERABILITE)	
Sur la culture fourragère	
Quelles sont les espèces fourragères les plus affectés (sensibles) ?	☐ …… ☐ ……
Quels sont les sources majeures d'émission de GES dans les systèmes de pâturage ?	☐ Les feux de brousses ☐ La fermentation des lisiers ☐ ……
Avez-vous noté des baisses de rendements ?	☐ Oui ☐ Non ☐ Autres : ……

Avez-vous noté de productivité ces dernières années ?	☐ Oui ☐ Non ☐ Autres : ……
A quoi cela est-il dû ?	
Comment cela se manifeste-t-il ?	
Les coûts du système de pâturage ont-ils :	☐ Augmenté ? ☐ Baissé ?
A quoi cela est-il dû ?	
STRATEGIES D'ADAPTATION (CAPACITE)	
Avez-vous déjà eu à initier des actions pour anticiper sur les effets de ces risques ?	
Avez-vous déjà bénéficié d'un appui externe (projet/programme) pour anticiper sur les effets de ces risques ? si oui, quel appui ?	
Une fois que les effets surviennent, quelles sont les initiatives que vous prenez pour réduire votre vulnérabilité ?	

A votre avis, ces initiatives sont-elles satisfaisantes (suffisantes et efficaces) ?	
A votre avis, quels autres types de réponses (initiatives) pourraient aider à réduire l'exposition de ces activités aux différents risques ?	
Pour combler les gaps, augmentez-vous les :	☐ Distances ☐ Superficies ☐ Moyens matériels de production de fourrage, ☐ Avez-vous gardé les mêmes techniques
Y a-t-il des incidences sur les coûts ?	☐

Annexe 3 : Méthode de prélèvement d'échantillon pour le stock de COS

Les étapes suivantes ont été suivies pour le prélèvement des échantillons :

1. Tracer un carré de 1 m x 1 m

2. Couper la végétation au-dessus du point de collecte nécessaire pour le cylindre

3. Placer le cylindre creux sur le point de collecte du sol (cf. figure 5). Ensuite, enfoncer le cylindre à l'aide d'un marteau en bois. Puis, débarrasser les terreaux à l'extérieur du cylindre par un couteau. Une pelle ou une truelle est ensuite utilisée, pour couper et soulever le sol prélevé.

4. Le trou issu du premier prélèvement doit avoir une bonne surface avec des parois stables afin d'éviter que les sols de surface ne retombent dans le fond. L'échantillon doit alors être prélevé de préférence sur les parois, à une profondeur bien définie.

5. Une fois prélevé, l'échantillon de sol est transféré dans un contenant (sachet en plastique) approprié. Ensuite, le contenant est codifié et conservé afin de pouvoir le transporter au laboratoire dans les meilleurs délais. Le préleveur a procédé de la façon la plus systématique possible afin de pouvoir reproduire les mêmes conditions d'échantillonnage d'un emplacement à l'autre.